HORS-SÉRIE
SCIENCES ET AVENIR

CAHIER SPÉCIAL ILLUSTRÉ
Espace-temps, lumière, gravitation…
15 pages pour tout comprendre de ses théories

Avec
Le prix Nobel Claude Cohen-Tannoudji
Michel Cassé
Thibault Damour
Étienne Klein
Marc Lachièze-Rey
Jean-Pierre Luminet
Hubert Reeves…

1915 - 2015
100 ans de relativité générale

EINSTEIN
aujourd'hui

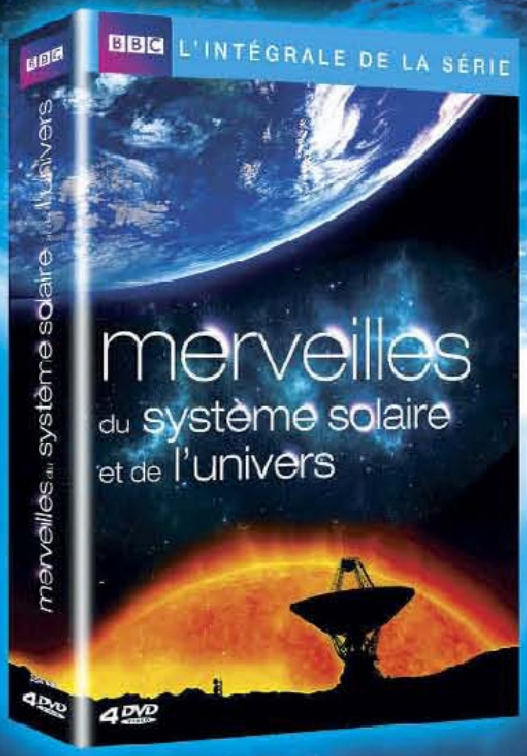
M 02597 - 180H - F: 4,90 € - RD

N°180 JANVIER / FÉVRIER 2015 - BELGIQUE 5 € / LUXEMBOURG 5 € / AUTRICHE 5 € / ITALIE 5 € / ALLEMAGNE 7,50 € / PORTUGAL (CONT) 5,30 € / GRÈCE 5 € / SUISSE 7,90 FS / ANTILLES-RÉUNION 5 € / ESPAGNE 5 € / MAROC 50 D / TUNISIE 6,2 DTU / CANADA 7,50 $ CAN / USA NY 7,50 $ US / TOM (AVION) 1200 CFP / AFRIQUE 3000 CFA

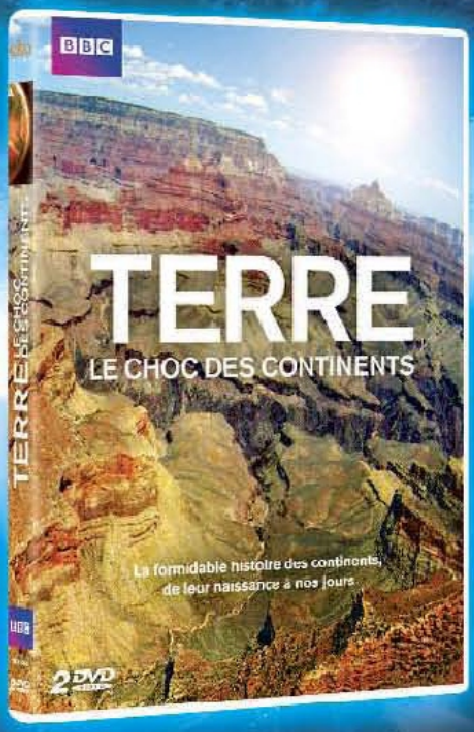
SOURCE: ROGER-VIOLLET, ILLUSTRATION: MEHDI BENYEZZAR

BBC

vous invite à 2 voyages extraordinaires



Du soleil à Neptune, la **fascinante exploration** de notre planète et du **système solaire**. Percez les mystères de l'**Univers** et de son origine.
« Les images les plus impressionnantes jamais vues sur petit écran » **TÉLÉRAMA**



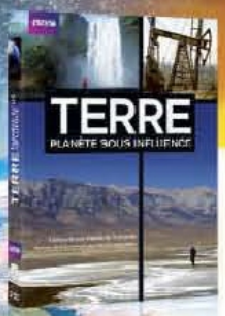
Découvrez la **formidable histoire des continents** en compagnie des plus grands spécialistes de la planète. **Le dernier volet** de la grande série documentaire diffusée sur **France 5**.
Des **images éblouissantes** tournées en **HD** !

EN COFFRET DVD VIDEO ET Blu-ray Disc

PARTOUT ET SUR **WWW.KOBAFILMS.FR**

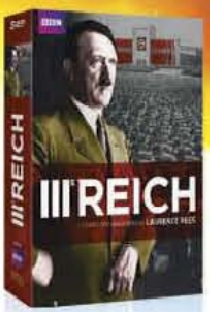
TERRE PUISSANTE PLANÈTE

TERRE PLANÈTE SOUS INFLUENCE



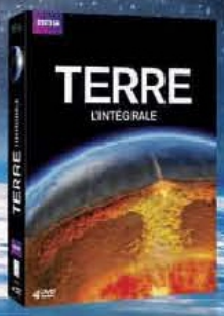
TERRES DE GLACE

IIIè REICH de LAURENCE REES



LA COLLECTION NATURE

TERRE L'INTÉGRALE



BA MERVEILLES

BA TERRE

20 minutes

SCIENCES ET AVENIR

koba FILMS

Édito

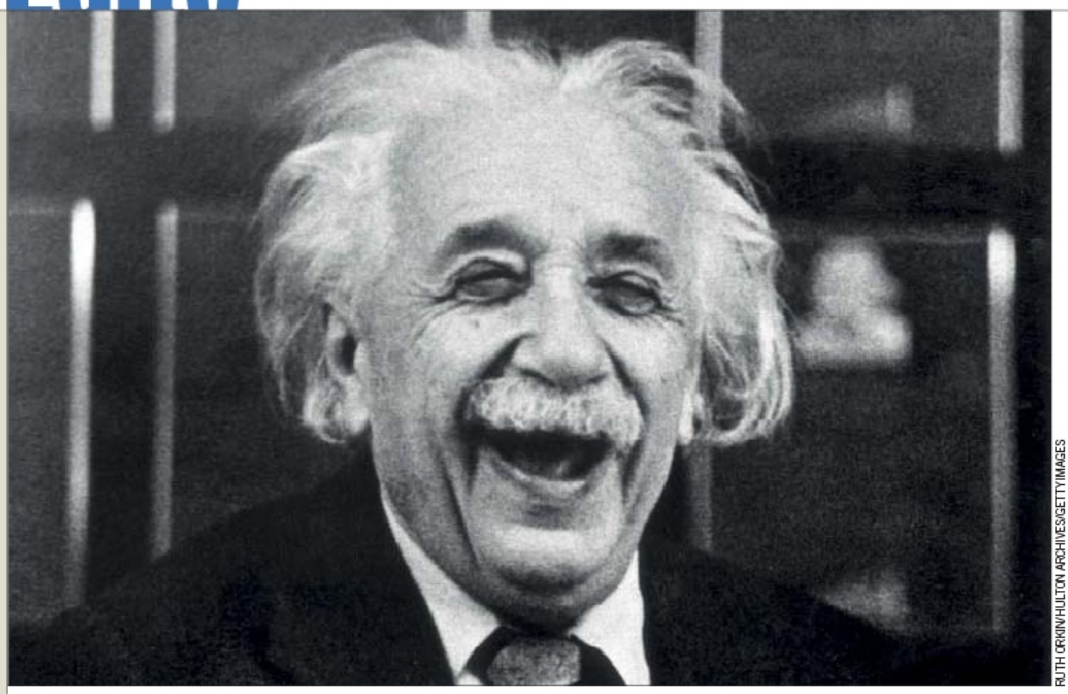
HORS-SÉRIE SCIENCES ET AVENIR

41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU 56.02
Rédactrice en chef Aline KINER 56.42
avec Vincent REA 56.35
Secrétaire de rédaction Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaboratrice
Azar KHALATBARI
Ont collaboré à ce numéro
Mehdi BENYEZZAR, Yves BLANC,
Audrey BOEHLY, Franck DANINOS,
Jean-François HAÎT, Philippe PAJOT,
Hervé PONCHELET
Renseignements aux lecteurs, vente au numéro
Isabelle RUDI-HOUET 01.55.35.56.50/56.30.
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Comptabilité Mélanie BENKHEDIMI 56.14,
Nathalie TREHIN 56.12,
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01

Abonnements :
01.40.26.86.11
142, rue Montmartre, 75002 Paris

Photogravure Nouvel Observateur
01.44.88.36.83
Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable WEB Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes :
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directrice commerciale adjointe
Paule COUDERAT 01.44.88.34.55
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Philippe MENAT
01.44.88.35.02 assisté de Lina QUACH 34.54
Relations extérieures
France ROQUE 01.44.88.35.79
Sciences et Avenir SARL
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Vente au numéro, **41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris.** Tél. : 01.55.35.56.00. Fax 01.55.35.56.04.
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, Service abonnements, 142, rue Montmartre, 75002 Paris. Tél. : 01.40.26.86.11. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : ID OBS, 10-12, place de la Bourse, 75002 Paris. Tél : 01.44.88.34.34.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 55491.
Distribué par NMPP.
Photogravure :
PCH, 10 -12, place de la Bourse 75002.
Dépôt légal : 562. Imprimerie : Sego, Taverny.
Printed in France.



RUTH ORKIN/HULTON ARCHIVES/GETTY IMAGES

Scientifiquement (in)correct !

L'idée la plus heureuse de sa vie ! C'est en ces termes passionnés qu'Albert Einstein évoquait la relativité générale, qu'il livra au monde en 1915. Une théorie révolutionnaire selon laquelle *« la matière dit à l'espace comment s'incurver. Et l'espace dit à la matière comment se mouvoir »*, ainsi que le synthétisa avec élégance le théoricien américain John Archibald Wheeler. Cent ans plus tard, *Sciences et Avenir* a pu mesurer l'actualité plus vive que jamais de cette *« heureuse idée »*. Le chef-d'œuvre d'Einstein, selon l'astrophysicien Hubert Reeves. Dix-sept scientifiques ont d'ailleurs accepté avec enthousiasme – et nous les en remercions – notre invitation à expliquer en quoi les écrits du physicien continuent de les inspirer *(pp. 73-81)*.

C'est peu de dire qu'Einstein inspire les esprits. Il semble, telle une des forces de la nature, les attirer irrésistiblement pour mieux les pousser ensuite dans leurs retranchements. Il les oblige à penser l'Univers comme un tout, et à entreprendre de traduire ce tout en équations. Une tâche digne de Prométhée, qui vola le savoir divin. Einstein ne dédaignait pas en son temps de dialoguer aussi, à sa manière, avec les puissances invisibles. Comme désireux de se rapprocher des *« secrets du "Vieux" »*. Entendez Dieu soi-même, dont il était convaincu qu'*« Il ne joue pas aux dés » (p. 41)*. Affirmation célèbre et fascinante pour tous ceux que le hasard rebute… Mais aussi contestée ! Et tout particulièrement par Niels Bohr, autre grand esprit de la physique, qui n'avait pas manqué de s'insurger : *« Qui êtes-vous, Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? »*

Est-ce cette expression libre de tout scientifiquement correct qui séduit aujourd'hui ses admirateurs ? Car ils demeurent nombreux, ceux que continue de fasciner le génie disparu au mitan du xx^{e} siècle. L'attirance pour la figure universelle vire parfois au juteux business *(p. 23)*. Mais, le plus souvent, elle se nourrit de déclarations politiques, morales, philosophiques… Le scientifique ne dit-il pas : *« Ne faites jamais rien contre votre conscience, même si l'État vous le demande »* ? Une insurrection de la pensée – résistance essentielle lors des temps du nazisme – qui continue d'animer tous ceux que l'éthique transforme en rebelles.

En ce centième anniversaire d'une théorie toujours si féconde, *Sciences et Avenir* a aussi voulu rendre hommage à l'homme. En explorant notamment les archives de l'Université hébraïque de Jérusalem, qui a entrepris d'étudier les 80 000 documents, scientifiques et personnels, légués par le savant *(pp.18-23)*. Avec numérisation puis… dissémination à la clé. De quoi faire flotter encore plus loin l'esprit d'Einstein, de Mercure au Soleil *(pp. 55-59)*, des pulsars aux trous noirs *(pp. 24-29)*, et remonter jusqu'aux premiers temps de l'Univers.

DOMINIQUE LEGLU, DIRECTRICE DE LA RÉDACTION

Des questions de **santé** ?

Des questions de **recherche** ?

Des questions d'**actualité** ?

Les réponses dans **Science & Santé**

le magazine de l'Inserm

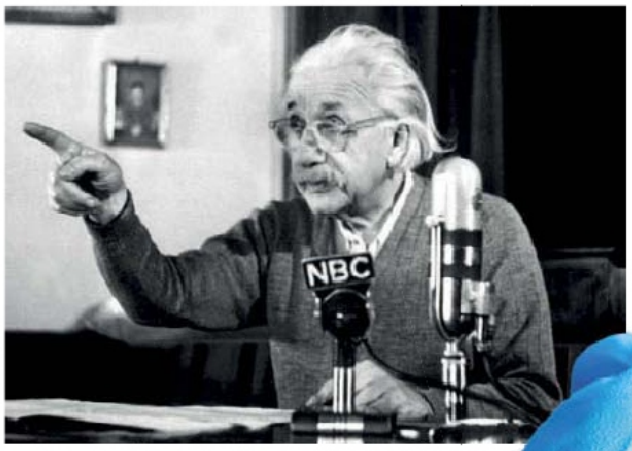
Abonnement gratuit sur simple demande à science-et-sante@inserm.fr

Instituts thématiques

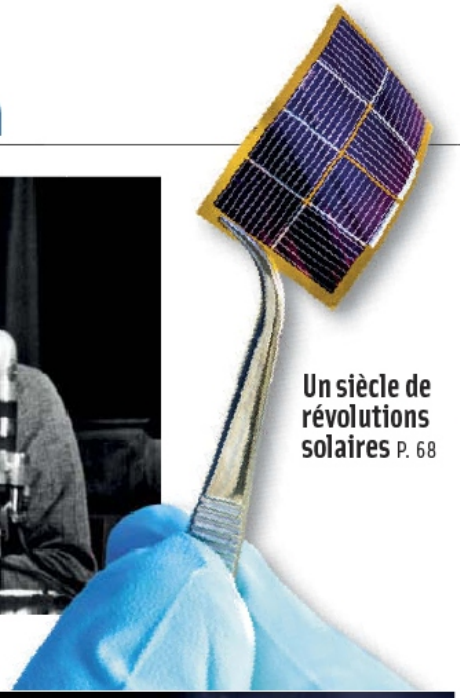
Inserm

Institut national
de la santé et de la recherche médicale

Sommaire



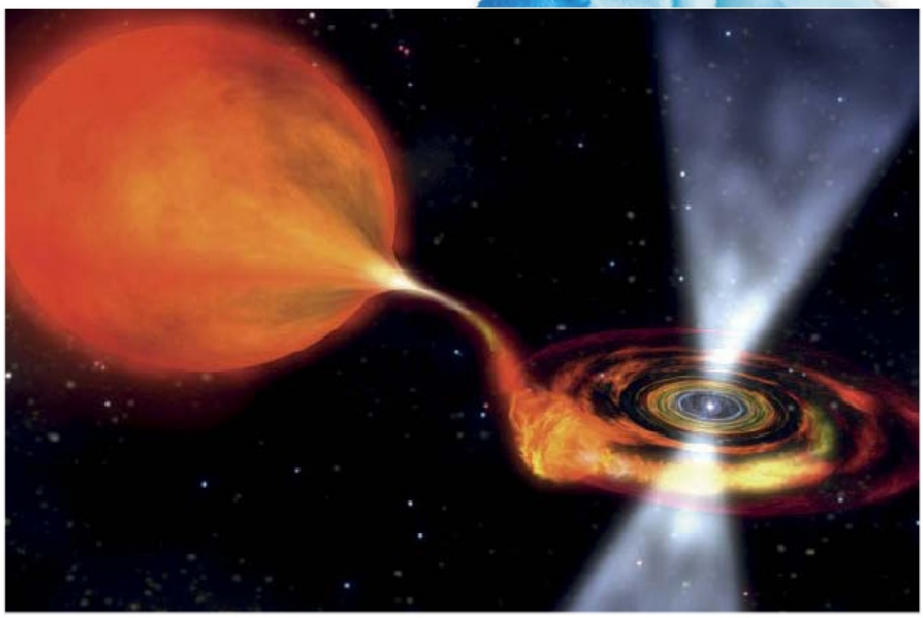
AGIP/RUE DES ARCHIVES



PATRICK LAUNAY/LUDOVIC AIGRON/SCIENCES PO/UPMC/SCIENCES ET AVENIR

Un siècle de révolutions solaires P. 68

Un génie rebelle P. 10

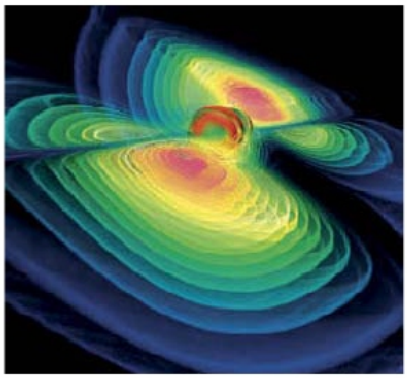


DANA BERRY/NASA/CHANDRA

Les pulsars, témoins des frissons de l'espace-temps P. 24

GETTY IMAGES

La Bourse livrée au hasard P. 64



NUMERICAL RELATIVITY GROUP, FSU JENA

En attendant la vague cosmique P. 30

3 ÉDITO

6 LA RÉVOLUTION EINSTEIN

10 UNE VIE EN IMAGES
Le génie rebelle

18 Reportage en Israël
Dans le secret des manuscrits

24 Pulsars
Témoins des frissons de l'espace-temps

30 Ondes gravitationnelles
En attendant la vague cosmique

35 REPÈRES

36 Le chaos bien ordonné des particules

39 La lumière est quantique

42 Les paradoxes de l'espace-temps

46 Les chemins sinueux de la gravitation

50 Lentilles gravitationnelles
Des planètes extrasolaires surprises par la lumière

55 Effets gravitationnels
Les révélations de Mercure, planète excentrique

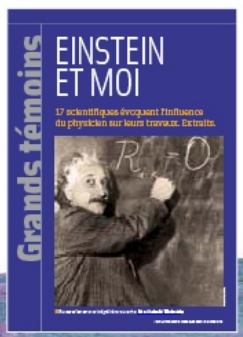
60 Horloge atomique
Des atomes froids et lents pour mesurer le temps

64 Finance
Les marchés boursiers livrés au hasard

68 Énergie solaire
Un siècle de révolutions

73 Einstein et moi
17 scientifiques témoignent

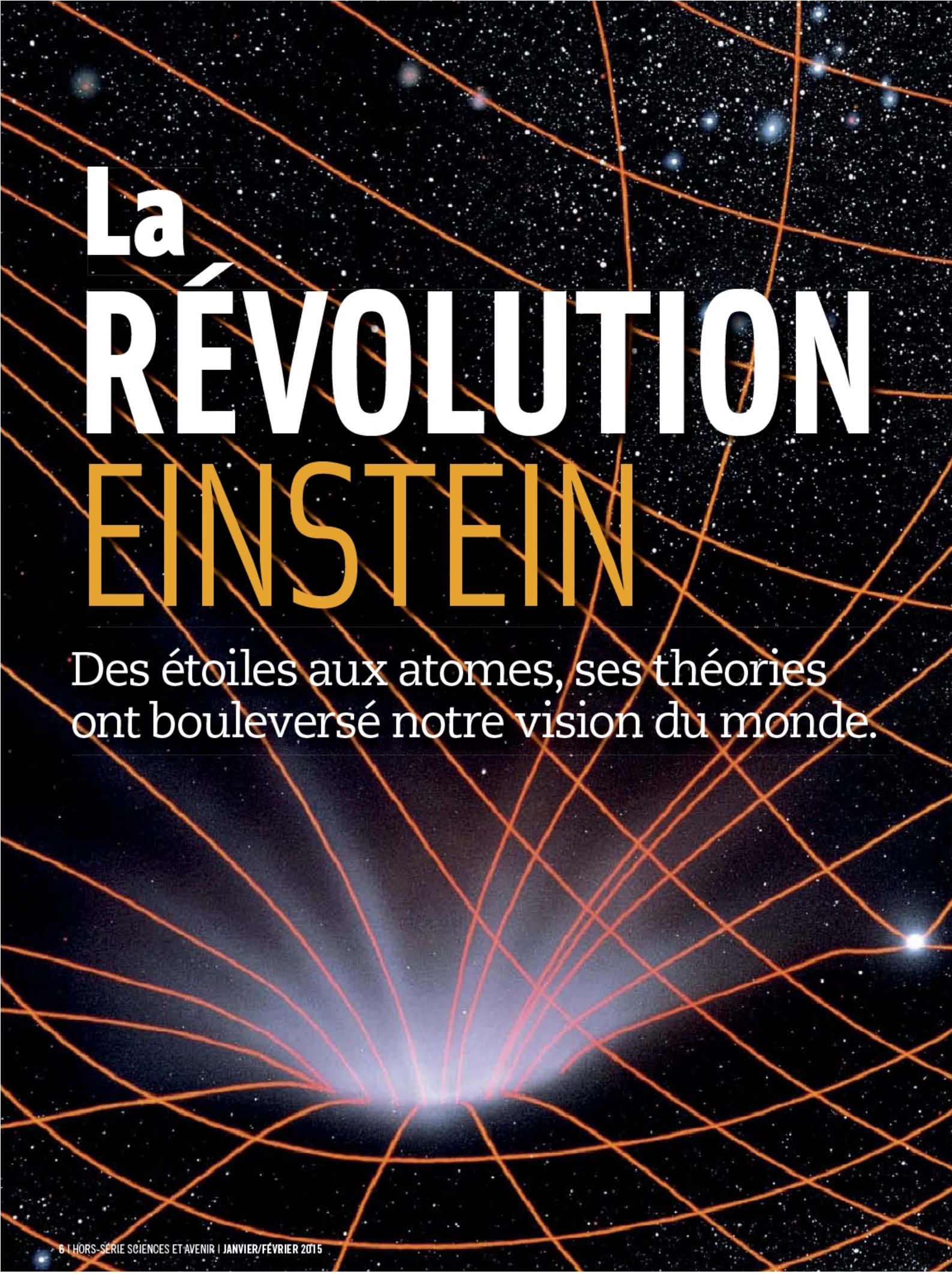
82 À voir, à lire



17 physiciens évoquent l'influence d'Einstein sur leurs travaux P. 73

NASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY/APL

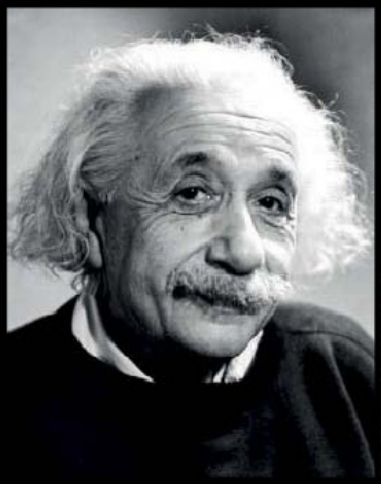
Les révélations de Mercure, planète excentrique P. 55



La RÉVOLUTION EINSTEIN

Des étoiles aux atomes, ses théories ont bouleversé notre vision du monde.

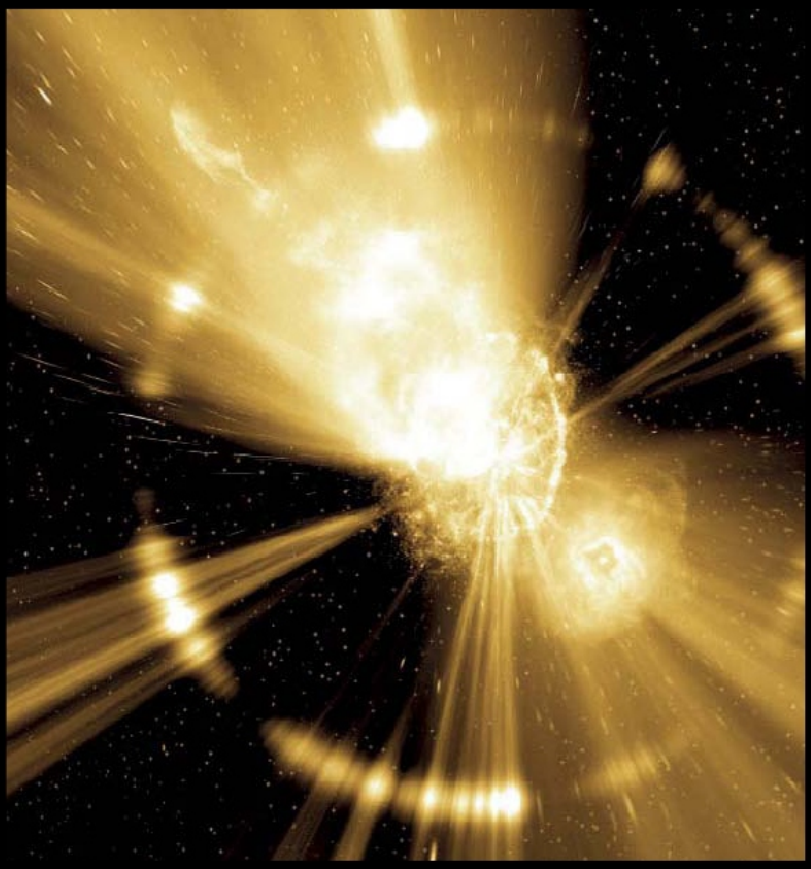
JULIAN BAUM/SPL/COSMOS



PICTURE ALLIANCE/RUE DES ARCHIVES

Après Einstein, rien ne fut plus comme avant. C'est une véritable révolution de la pensée qui a eu lieu dans les premières décennies du XX^{e} siècle. Les travaux du physicien ont fait voler en éclats les concepts les plus familiers : le temps, l'espace, la matière. Il nous a fallu plus d'un siècle pour nous habituer à cette représentation du monde qui défie nos intuitions. Et pourtant, aucune expérience n'est jamais venue contredire les théories d'Einstein. Ce nouveau monde, nous en sommes aujourd'hui les héritiers.

AZAR KHALATBARI



MEHAU KULYK/SPL/COSMOS

LA LUMIÈRE a une vitesse finie

La vitesse de la lumière est certes élevée, mais pas infinie. Et cela change tout ! Avec Einstein, elle devient l'unité de mesure absolue. Quant à la simultanéité des événements, elle apparaît comme une illusion. Car nous ne voyons que dans le passé : l'explosion d'un astre, saisie au bout de nos télescopes, a eu lieu il y a un « certain temps ». Précisément le temps nécessaire à la propagation de sa lumière jusqu'à la Terre.

L'UNIVERS devient objet de science

L'équation de la relativité générale décrit comment la matière et l'énergie modifient la géométrie de l'espace-temps. Ainsi armés, nous pouvons penser l'Univers dans lequel nous sommes plongés. Étudier sa forme, son évolution, tester des théories le concernant. Avec Einstein, notre vue porte jusqu'à l'horizon cosmologique, à plus de 13 milliards d'années-lumière !

MEHAU KULYK/SPL/COSMOS

LE TEMPS est relatif

Avant Einstein, les secondes passaient inlassablement à la même allure et ce, partout dans le cosmos. La relativité générale a balayé cette simplicité. À proximité d'un astre dense, le temps s'écoule plus lentement, et va jusqu'à se figer au cœur d'un trou noir. Quant à nos horloges, elles ne marquent qu'un temps local, lié à notre environnement gravitationnel.

B. TAFRESCHI/ESO

L'ESPACE est élastique

L'espace n'est plus une entité absolue : alors qu' il formait jadis la trame du monde, une toile de fond figée et uniforme, après Einstein, il est seulement l'expression des masses qu'il contient. Un astre léger le laisse inchangé, une étoile dense comme un trou noir y crée une distorsion comparable à un puits sans fond.

NASA/ESA/HUBBLE SPACE TELESCOPE

Il n'a que vingt-six ans lorsqu'il bouleverse les fondements de la physique. Homme de convictions, esprit révolutionnaire, Einstein sera guidé toute sa vie par une seule obsession : la quête du savoir.

Un génie rebelle

PAGES RÉALISÉES PAR VINCENT REA

RUE DES ARCHIVES

RUE DES ARCHIVES

Enfance Albert Einstein naît à Ulm (Allemagne) le 14 mars 1879. Ses parents, juifs non pratiquants, appartiennent à la moyenne bourgeoisie d'affaires. Sa sœur Maja naît deux ans plus tard (ci-dessus avec lui), alors que la famille s'est installée à Munich, où il fera sa scolarité. L'élève Einstein (ci-contre) excelle en sciences, mais se montre rétif à l'autorité.

HERITAGE IMAGES/LEEMAGE

Études En 1894, ses parents s'installent en Italie. Lui renonce à la nationalité allemande, décide d'entrer à la prestigieuse École polytechnique de Zurich en Suisse, mais rate le concours. Il s'inscrit alors au lycée de Aarau (ci-contre) avant d'être admis au Polytechnicum l'année suivante.

RUE DES ARCHIVES TALLANDIER

Premier mariage Einstein rencontre Mileva Maric (ci-dessus), jeune Serbe à l'esprit brillant, la seule fille de sa promotion. Ils seront amants, puis mariés (en 1902), séparés (en 1914) et divorcés (en 1919). Entre-temps, ils auront eu trois enfants.

« En apparence, la vie n'a aucun sens, et pourtant, il est impossible qu'il n'y en ait pas un ! »

Die anerkannt beste
Hektographen-Masse
liefert billigst und empfiehlt sich zur Lieferung **neuer Hektographen**, sowie zum **Umguss** oder **Neufüllung**
Franz Anneler, Malerweg 9 (Längg.) u. Vereinsdruckerei.
Guss von Wälzchen für Mimiographen.

Vermischtes

Privatstunden in
Mathematik u. Physik
für Studierende und Schüler erteilt gründlichst
Albert Einstein, Inhaber des eidgen. natut. Fachlehrerdiploms.
Gerechtigkeitsgasse 32, 1. Stock.
Probestunden gratis. ,4977'

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE BERNE

Professeur particulier
Diplômé en 1900, Einstein obtient la nationalité suisse. Pour vivre, il donne des cours particuliers : ici une petite annonce proposant des leçons de physique et de maths.

AKG IMAGES

WHITEIMAGES/LEEMAGE

AKG IMAGES

Le cercle des proches Chez son ami le physicien autrichien Paul Ehrenfest avec ses confrères Paul Langevin, Heike Kamerlingh Onnes et Pierre Weiss, en 1922.

L'assemblée des grands esprits Les meilleurs physiciens et chimistes se réunissent chaque année en Belgique au congrès Solvay. Ici en 1911 avec notamment Marie Curie, Max Planck, Paul Langevin et Henri Poincaré.

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS/SPL/COSMOS

1879
Naissance à Ulm (Allemagne) le 14 mars.

1880
La famille s'installe à Munich.

1888
Entre au lycée Luitpold où il excelle en sciences.

1894
Il abandonne ses études secondaires et renonce à sa nationalité. Concours du prestigieux Polytechnicum de Zurich. Échec.

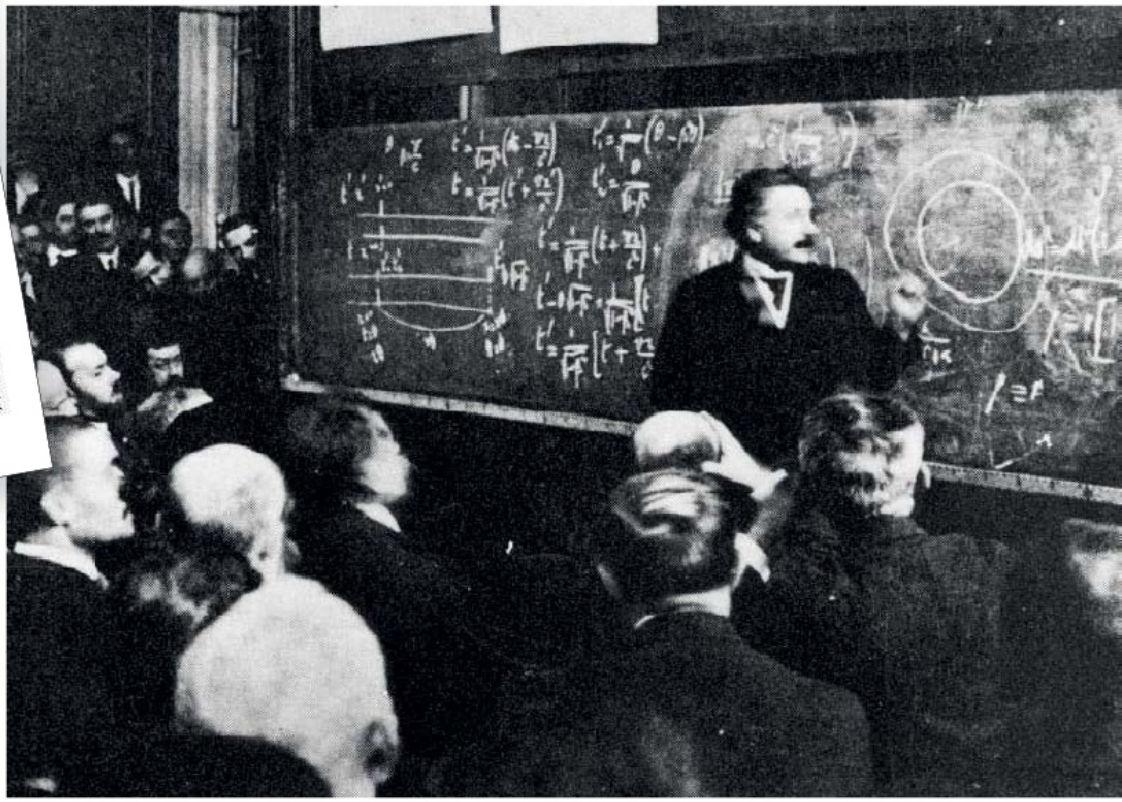
1895
Premier essai scientifique, « Réflexions sur l'état de l'éther dans un champ magnétique ».

1896
Il réussit à entrer à l'École polytechnique fédérale. Rencontre l'étudiante serbe Mileva Maric.

1900
Il donne des cours particuliers. Ses premiers articles scientifiques passent inaperçus.

ANNALEN DER PHYSIK.
VIERTE FOLGE. BAND 49.

THE GRANGER COLLECTION NYC/RUE DES ARCHIVES



AKG IMAGES

L'avènement de la relativité générale Einstein travaille sur cette théorie depuis 1907. Achevés en novembre 1915, ses travaux sont publiés l'année suivante. En 1919, l'observation d'une éclipse solaire permet à l'astrophysicien anglais Eddington de confirmer la « courbure » de l'Univers.

Dispute quantique Einstein s'est farouchement opposé aux théories quantiques, pourtant issues en partie de ses propres recherches sur la lumière. Ses discussions enflammées (ici en 1930) avec le physicien danois Niels Bohr, père de la mécanique quantique, sont célèbres.

1902
Embauché à l'Office fédéral des brevets à Berne, il prend la nationalité suisse. Naissance de sa fille Lieserl (probablement abandonnée), fille de Mileva.

1903
Trois mois après la mort de son père Hermann, il épouse Mileva.

1904
Naissance de son fils Hans-Albert.

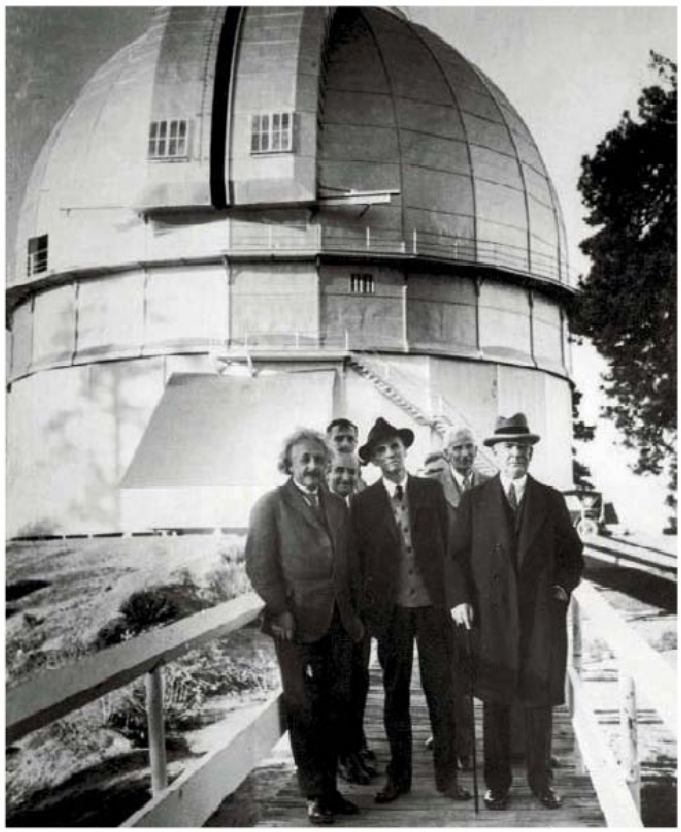
1905
Publication des articles sur les quanta de lumière, le mouvement brownien, la relativité restreinte et l'équivalence masse-énergie ($E= mc^2$).

« Le problème de la gravitation m'occupe totalement. À côté de cela, la relativité restreinte n'est qu'un jeu d'enfant »

ROGER VOLLET

Du Nobel à Planck En 1929, l'Allemand Max Planck, prix Nobel 1918 pour ses travaux sur les quanta, et Einstein se voient décerner la médaille… Max Planck. Einstein a lui-même reçu le Nobel de physique en 1921.

Reconnaissance internationale Einstein multiplie les voyages à l'étranger, notamment aux États-Unis. On le voit ici en 1930 en visite à l'observatoire du mont Wilson (Californie), qui abritait à l'époque le plus grand télescope du monde.



IMAGNO/ROGER VOLLET

LIBRARY OF CONGRESS/RUE DES ARCHIVES

Distinctions Les titres honorifiques se succèdent. De 1931 à 1933, Einstein est chercheur au Christ Church College d'Oxford (à droite), où il reçoit une bourse de 400 livres par an. Il en partira pour Princeton, aux États-Unis. Il demandera alors que la somme qui lui était allouée soit utilisée pour aider l'exfiltration d'universitaires juifs persécutés par le régime nazi.

SUDDEUTSCHE ZEITUNG/RUE DES ARCHIVES

1909
Professeur à l'École polytechnique de Zurich. Il énonce la dualité onde-corpuscule du rayonnement électromagnétique.

1910
Naissance de son second fils, Eduard.

1911
Au congrès Solvay, à Bruxelles, il rencontre les plus grands scientifiques de son temps.

1914
Il est nommé à l'Institut Kaiser Wilhelm à Berlin et fréquente sa cousine Elsa Löwenthal. C'est un pacifiste convaincu.

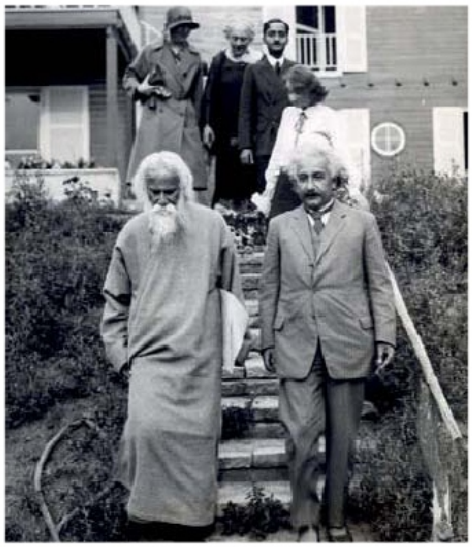
1915
Formulation définitive de la théorie de la relativité générale.

1919
Divorce d'avec Mileva. Mariage avec Elsa. Le Britannique Arthur Eddington observe la déviation des rayons lumineux par le Soleil lors d'une éclipse, confirmant la relativité générale. Einstein devient une star mondiale.

« Ne faites jamais rien contre votre conscience même si l'État vous le demande. »

Globe-trotteur planétaire Dans les années 1920, Einstein, tout en poursuivant ses travaux, voyage dans le monde entier. Il donne partout des conférences, qu'il s'agisse d'expliquer ses théories, de militer pour la paix ou de lever des fonds pour la création d'un foyer juif en Palestine.

CORBIS



SPAARNESTAD/RUE DES ARCHIVES

BETTMANN/CORBIS

L'exil face au nazisme Avec la montée du nazisme en Allemagne au début des années 1930, Einstein fait l'objet d'une violente campagne de calomnie. Ses livres sont brûlés en place publique et sa maison, où il avait accueilli en 1930 le prix Nobel de littérature indien Rabindranath Tagore (ci-contre), pillée. De retour d'un voyage aux États-Unis (en haut à gauche, en Californie), il accepte l'invitation de l'Institute for Advanced Studies de Princeton. Son départ d'Allemagne est définitif. Aux États-Unis, il retrouvera d'autres émigrés, comme le réalisateur Ernst Lubitsch (ci-dessus).

1921
Lauréat du prix Nobel de physique. Monte avec Chaïm Weizmann le projet de l'Université hébraïque de Jérusalem.

1922
Einstein publie la première ébauche d'une théorie unifiant toutes les lois de la physique.

1927
Débat avec le physicien danois Niels Bohr au sujet de la mécanique quantique.

1928
Il est nommé président de la Ligue des droits de l'Homme.

1932
Formulation avec l'astronome néerlandais Willem de Sitter d'une théorie de l'Univers qui évoque l'existence d'une « matière sombre ».

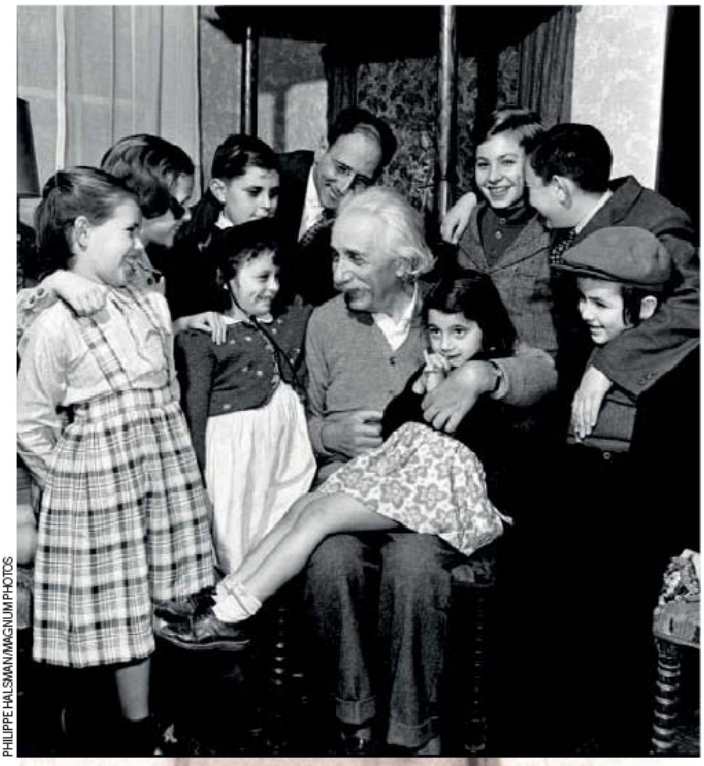
1933
Émigration aux États-Unis. Il s'installe à Princeton.

RUE DES ARCHIVES/BCA

HOLLYWOOD ARCHIVES/PICTURELUXBUREAU 233

Le choix de l'Amérique En 1940, Einstein, qui était suisse depuis 1901, devient citoyen américain. Ci-dessus, il prête serment entre sa secrétaire Helen Dukas (à gauche) et sa belle-fille Margot.

Le dilemme de la bombe atomique Pacifiste convaincu, Einstein doit se rendre à l'évidence : Hitler ne sera renversé que par les armes. En 1939, avec son ami Leo Szilard (ci-contre), il écrit au président Roosevelt pour le convaincre de l'urgence de développer une bombe « nucléaire ». Toutefois, il ne participera pas à sa mise au point et enverra même une nouvelle lettre au président, en 1945, pour lui demander d'abandonner ce projet.



PHILIPPE HALSMAN/MAGNUM PHOTOS

« On ne résout pas un problème avec les modes de pensée qui l'ont engendré »

CENTRAL ZIONIST ARCHIVES

Le sioniste militant
Dès 1921, Einstein s'intéresse à la question juive et adhère au mouvement sioniste. En 1923, un voyage en Palestine marqué d'étapes symboliques, comme ici la plantation d'un arbre sur le mont Carmel, le convainc du bien-fondé d'y implanter un foyer national juif. Mais il combattra quelques années plus tard la création d'un État juif, redoutant le développement d'un nationalisme sans pitié, et refusera de devenir le président du tout jeune État d'Israël.

AGIP/RUE DES ARCHIVES

1935
Critique de la mécanique quantique dans un article écrit avec B. Podolsky et N. Rosen.

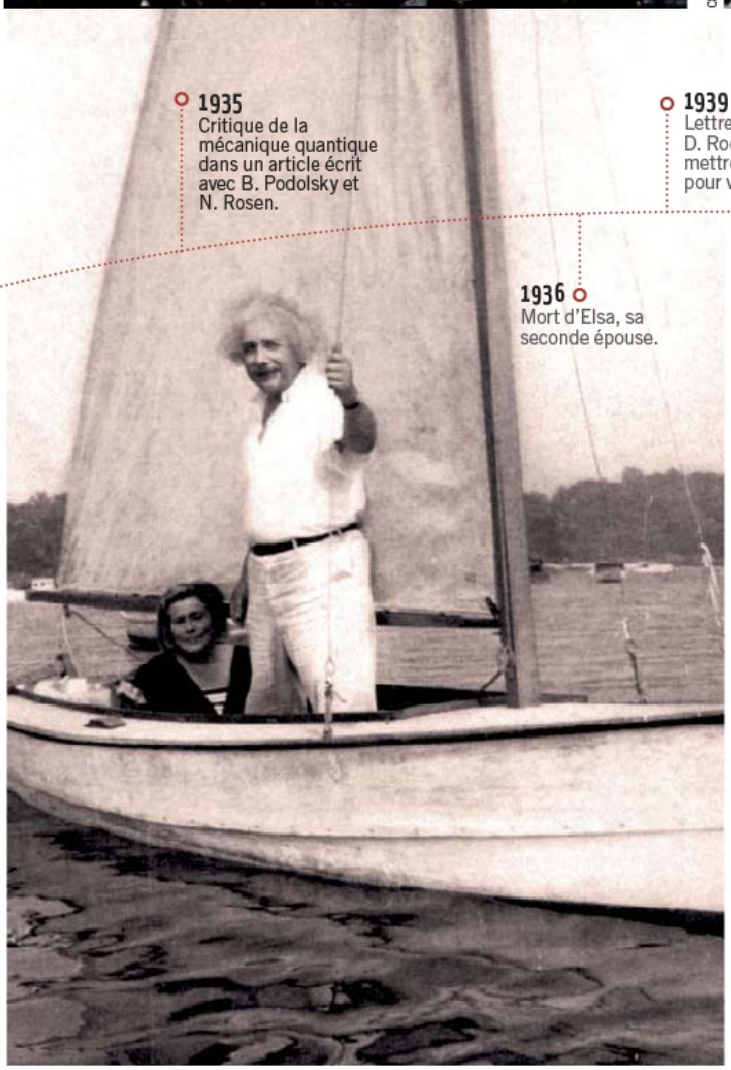
1936
Mort d'Elsa, sa seconde épouse.

1939
Lettre au président américain Franklin D. Roosevelt concernant l'urgence de mettre au point une bombe atomique pour vaincre l'Allemagne nazie.

1940
Il prend la nationalité américaine.

1945
Nouvelle lettre à Roosevelt afin de le dissuader d'utiliser l'arme nucléaire.

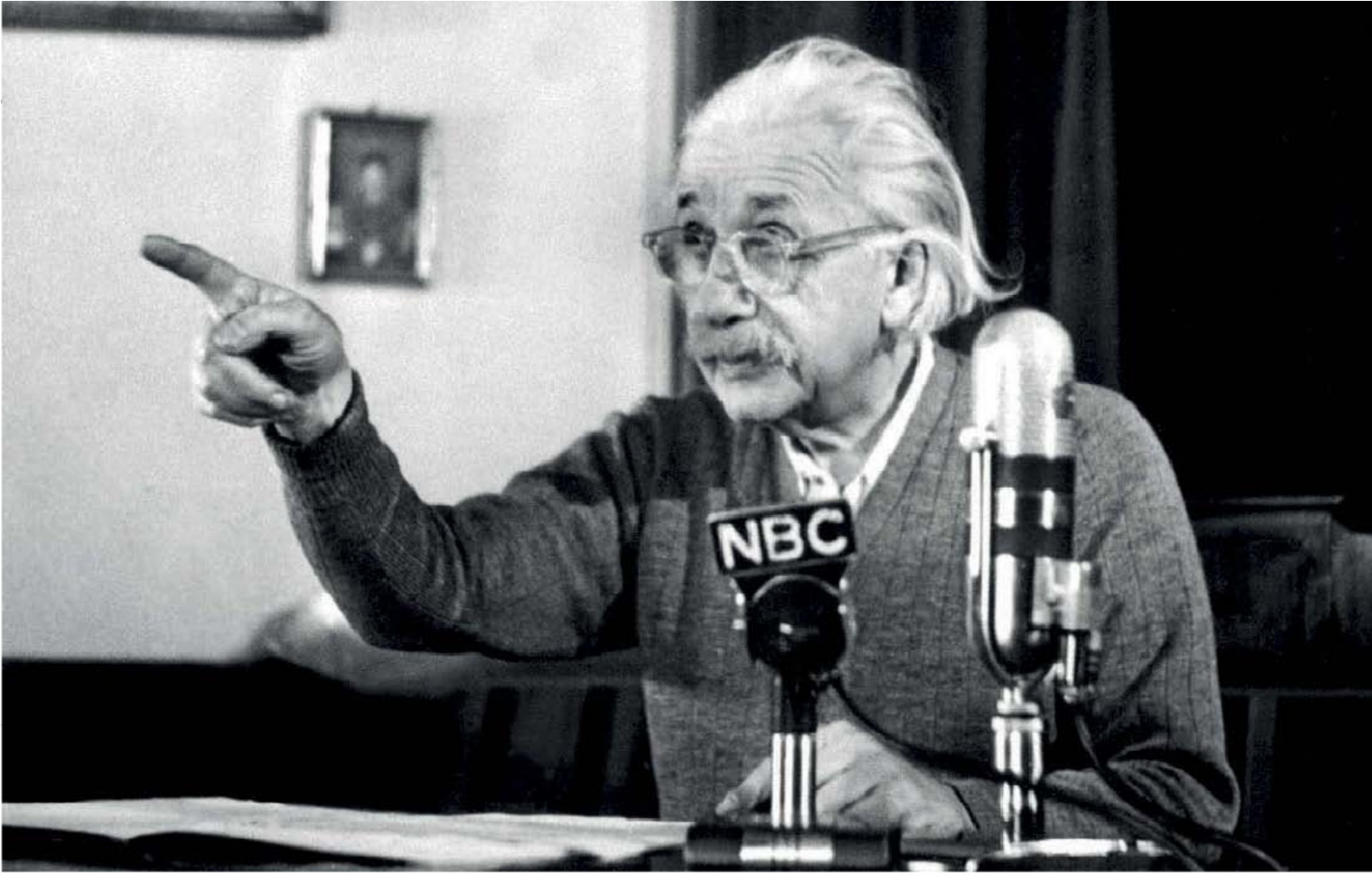
1948
Décès de sa première épouse, Mileva.



IAM/AKG IMAGES

CORBIS

Moments d'évasion Passions de toujours, le violon (avec un faible pour Bach) et la voile. Bien que ne sachant pas nager, il s'y adonne avec plaisir, à Princeton ou à Long Island. Il avouera qu'il se sent privilégié de vivre à Princeton « comme sur une île… où le chaos des conflits humains pénètre à peine ».



Le pacifiste convaincu Homme de paix depuis toujours, Einstein est de toutes les manifestations contre la guerre dans les années 1920/1930, et devient président de la Ligue des droits de l'homme en 1928. Après 1945, il se fait le chantre de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire (ici lors d'un discours radio en 1950), sous l'égide d'un gouvernement mondial.

1949
Dernières publications, notamment sur une théorie réconciliant la relativité et la physique quantique.

1950
Il prend position publiquement contre la bombe H.

1952
Einstein refuse de devenir président du jeune État d'Israël.

1955
Albert Einstein meurt le 18 avril, des suites d'une rupture d'anévrisme de l'aorte. Ses cendres sont dispersées dans un lieu conservé secret.

CORBIS

SPL/AKG IMAGES

Le grand regret d'Einstein Il s'entretient ici avec Julius Oppenheimer, le « père » de la bombe, en 1947. Einstein exprimera ses regrets après la guerre : « Si j'avais su que les Allemands ne réussiraient pas à fabriquer la bombe atomique, je n'aurais même pas levé le petit doigt. »

Ce qu'il n'a jamais dit…

Einstein a laissé à la postérité un florilège de formules percutantes… que certains n'ont pas hésité à «enrichir», en attribuant au savant des citations parfois extravagantes.

- Si l'abeille disparaissait de la surface du globe, l'humanité n'aurait plus que quatre années à vivre.
(Probablement inventé par l'Union nationale de l'apiculture française)

- Si vous ne pouvez expliquer un concept à un enfant de six ans, c'est que vous ne le comprenez pas complètement.
(D'après le roman Le Berceau du chat *de Kurt Vonnegut)*

- Deux choses m'inspirent crainte et respect : le ciel étoilé et l'univers moral à l'intérieur de moi. *(Emmanuel Kant)*

- L'astrologie est une science en soi illuminatrice. J'ai appris beaucoup grâce à elle, et je lui dois beaucoup.
(Citation placée par l'astrologue Elizabeth Teissier en exergue de sa thèse de doctorat)

- Si les faits ne concordent pas avec la théorie, alors changez les faits ! *(Aucune source avérée)*

- Le mal est l'absence de Dieu.
(Aucune source avérée)

- Remplir une feuille d'impôts est plus compliqué que la théorie de la relativité.
(Aucune source avérée)

Cahiers scientifiques, lettres, livres... L'Université hébraïque de Jérusalem abrite un trésor : 80 000 documents ayant appartenu à Albert Einstein. Ils dévoilent les processus de pensée du scientifique, mais aussi les hésitations et les engagements de l'humaniste.

Dans le secret des manuscrits

REPORTAGE DE JEAN-FRANÇOIS HAÏT À JÉRUSALEM
PHOTOS : LOULOU D'AKI/LUZPHOTO POUR SCIENCES ET AVENIR

C'est Einstein à bicyclette. La silhouette du savant ainsi mis en scène se fond parmi les étudiants qui prennent le soleil de midi sur le campus de Guivat Ram, à l'Université hébraïque de Jérusalem. Sur le bâtiment principal, une fresque le représente parmi les fondateurs de l'université, dont le premier campus a été inauguré en 1925 de l'autre côté de la vieille ville.

L'entreprise lui tenait à cœur : Einstein, qui soutenait le mouvement sioniste, voulait ainsi offrir un lieu d'étude aux étudiants israélites et stimuler l'installation des Juifs en Palestine. C'est pourquoi il décida de léguer un trésor à la jeune université : toutes ses archives personnelles, soit près de 80 000 documents : manuscrits d'articles scientifiques, dont bien sûr celui de la relativité générale, cahiers de notes, lettres de confrères, d'hommes politiques, d'artistes, de membres de sa famille… Ces documents ont été intégralement reproduits sous forme de microfilms et fac-similés. Considérés en Israël comme un trésor national, ils ne sortent plus d'un coffre dont l'humidité et la température sont contrôlées. Et une vaste entreprise de numérisation est en cours (1) avec l'aide du Caltech (Institut de technologie de Californie).

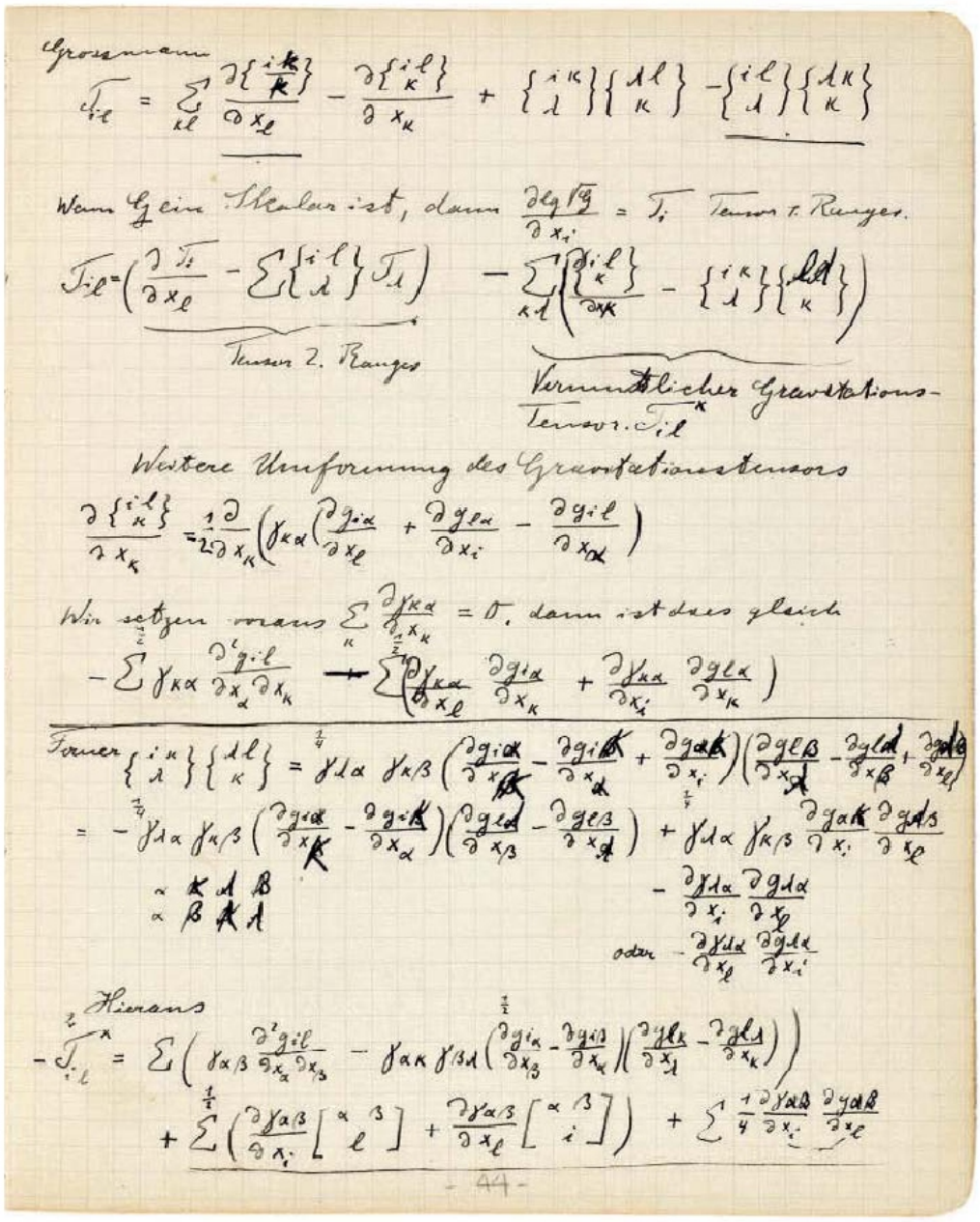
Le bulletin scolaire d'Einstein lycéen en 1896 (à gauche sur le bureau) et le premier feuillet du manuscrit de la relativité générale de 1915, présentés par Roni Grosz, conservateur des archives à l'Université hébraïque de Jérusalem. Entre ces deux dates, les manuscrits révèlent un intense cheminement intellectuel. Ci-dessous, une représentation d'Einstein sur le campus de l'université.

Aux commandes des archives, Roni Grosz raconte le destin de ce trésor de papier. *« Einstein ne prenait pas soin de ses archives personnelles. Par exemple, les manuscrits originaux des articles historiques publiés en 1905 ont disparu. Si, par la suite, de nombreux documents nous sont parvenus, c'est grâce à Helen Dukas. »*

Cette jeune Allemande recrutée comme secrétaire par Einstein en 1928 lui est restée totalement dévouée jusqu'à ses derniers jours… et même au-delà ! Car à partir de 1950, elle est devenue, avec Otto Nathan, ami de son patron, l'exécuteur testa- ●●●

●●● mentaire de ce fonds d'archives. Helen Dukas a ainsi préservé la mémoire d'un Einstein graphomane : il écrivait jusqu'à dix lettres par jour, dont elle conservait les brouillons. Cerveau « multitâche », il était aussi capable de griffonner des formules mathématiques sur un discours qu'il était en train de rédiger à propos de la paix dans le monde… Tout ceci est désormais classé et indexé.

Mais qu'apprend-on aujourd'hui des papiers d'un génie du début du XXe siècle ? *« Plus rien en physique, puisque tous les travaux ont été publiés. Mais beaucoup sur les processus intellectuels d'Einstein »*, explique Hanoch Gutfreund. Physicien théoricien, ancien président de l'Université hébraïque de Jérusalem, il se consacre désormais à l'analyse des documents scientifiques d'Einstein, *« comme on le ferait avec les pages du Talmud »*, note-t-il en souriant (2). Ils ont permis aux historiens des sciences de découvrir comment celui-ci est parvenu à la relativité générale. *« Il lui a fallu huit ans pour réaliser que la relativité restreinte n'était pas suffisante, qu'il fallait la généraliser ! Il a suivi un chemin sinueux parfaitement documenté dans les archives »*, explique Hanoch Gutfreund, qui prépare à ce sujet un ouvrage grand public (3).



THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM

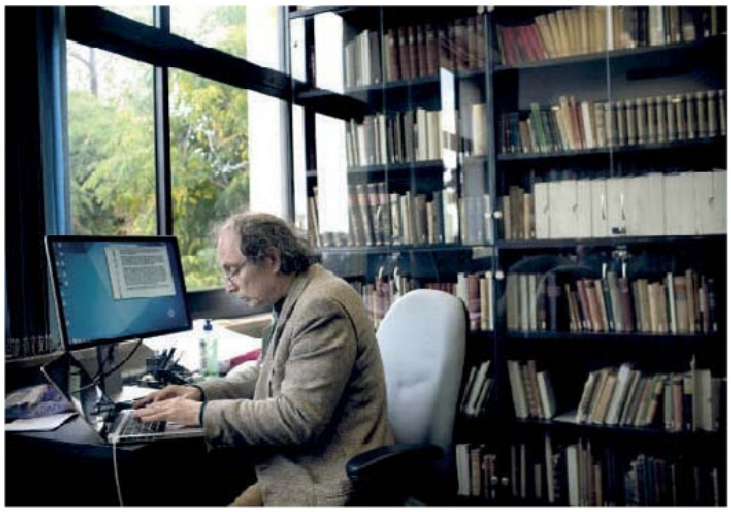
À partir de 1912, Einstein consigne son apprentissage mathématique, sous la houlette de son ami Marcel Grossmann, dans un document baptisé « cahier de Zurich » (ci-dessus). Ce travail l'aidera à élaborer la théorie de la relativité générale.

Ma plus grosse bourde

En 1912, Einstein réalise en effet qu'il ne possède pas les outils mathématiques sophistiqués dont il a besoin pour approfondir sa réflexion. *« Aide-moi ou je vais devenir fou ! »*, dit-il alors à son ami le mathématicien Marcel Grossmann. Avec ce dernier, il se lance dans l'étude de la géométrie riemanienne, indispensable à la poursuite de ses travaux. *« Nous possédons un document fondamental : le cahier de Zürich. C'est un carnet de notes de 96 pages rédigé dans cette ville, dans lequel Einstein a consigné son apprentissage mathématique »*, explique Hanoch Gutfreund. Soit des dizaines de formules, parfois interrompues par quelques puzzles mathématiques façon Tangram dessinés pour ses enfants. *« Le manuscrit montre qu'Einstein a rapidement obtenu l'équation qu'il cherchait pour la relativité générale. Mais il l'a mal interprétée et l'a abandonnée ! Il lui a fallu trois ans de tâtonnements et d'erreurs avant de se rendre compte, en 1915, qu'il devait y revenir »*, explique Hanoch Gutfreund.

En novembre 1915, Einstein soumet quatre articles sur la relativité générale à l'Académie des sciences de Prusse. Dès ce moment, il échange avec ses pairs des lettres sur l'impact de sa découverte. Notamment avec le Néerlandais Willem de Sitter, un pionnier de la cosmologie. Car Einstein a pressenti l'implication de sa théorie sur la description de l'Univers tout entier. Comme il croit en un Univers fixe, et qu'elle lui indique le contraire, il rajoute un terme dans ses équations : la fameuse « constante cosmologique ».

La découverte de l'expansion de l'Univers par l'astrophysicien américain Edwin Hubble en 1929 le fera changer d'avis. *« Tout le monde ou presque lui attribue à propos de la constante cosmologique la phrase : "C'est ma plus grosse bourde"*, note au passage Hanoch Gutfreund. *En fait, elle est simplement rapportée par le cosmologiste George Gamow dans un*



Einstein compte parmi les fondateurs de l'Université hébraïque de Jérusalem, représentés sur une fresque ornant l'entrée du bâtiment (ci-dessus). Ci-contre : les archives attirent des érudits comme Alain Findling, musicologue. Il tente de retrouver des écrits d'Einstein relatifs au violon, un instrument dont ce dernier jouait beaucoup.

de ses livres. Nous n'avons retrouvé aucun écrit d'Einstein dans lequel il tienne un tel propos. »

Autre échange fructueux: celui qu'il entretient avec l'astrophysicien allemand Karl Schwarzschild. Hanoch Gutfreund montre une carte postale de félicitations adressée à celui-ci par Einstein. Il y écrit: *« Je n'aurais jamais imaginé qu'on puisse formuler aussi simplement la solution. Je trouve votre traitement mathématique du sujet particulièrement séduisant. »* Dans sa publication de novembre 1915, Einstein rendait en effet compte avec la relativité générale de l'avance du périhélie de la planète Mercure, qui était un casse-tête pour les astronomes depuis des décennies *(lire aussi pp. 64-67).* Mais la solution à laquelle il avait abouti n'était qu'approximative. Le 22 décembre 1915, Schwarzschild lui avait écrit pour lui annoncer qu'il avait trouvé une solution exacte. L'astrophysicien avait aussi remarqué que sa solution prédisait l'existence d'une « singularité ». Ce qu'on appellera bien plus tard… un trou noir. La correspondance entre les deux savants a ainsi ouvert la voie à la cosmologie moderne.

COURTESY H. GUTFREUND

« Entre la relativité restreinte et la relativité générale, Einstein a suivi pendant huit ans un chemin sinueux parfaitement documenté dans les archives » **Hanoch Gutfreund, ex-président de l'Université hébraïque**

Au total, ce sont des centaines de lettres entre Einstein et le gratin de la physique mondiale qui sont en la possession de l'Université hébraïque ou qu'elle tente d'acquérir. *« Au-delà d'Einstein, c'est tout le contexte scientifique du début du XXe siècle qui est concentré dans les archives de Jérusalem »,* conclut Hanoch Gutfreund.

Le mythe du mauvais élève

Mais outre la science, Einstein s'est exprimé sur presque tous les sujets de son époque: la guerre, l'État d'Israël et le sionisme, l'art, etc. C'est pourquoi il intéresse aussi des chercheurs et érudits d'autres disciplines. Ce 3 novembre, c'est Richard Crockatt, historien et professeur émérite de l'université d'East Anglia à Norwich, au Royaume-Uni, qui est plongé dans les archives. Il s'intéresse aux opinions politiques et sociales d'Einstein. *« J'ai découvert en étudiant sa correspondance qu'il pouvait y avoir une grande différence entre ses prises de position publiques, des positions morales très simples,* ●●●

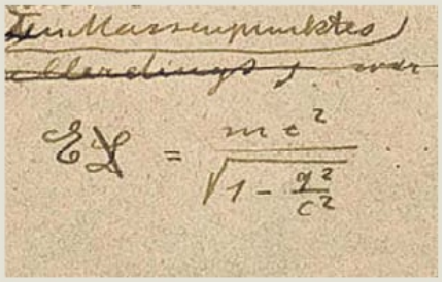
Ronit Sorek, conservatrice des manuscrits au musée d'Israël, manipule le document original de la théorie d'Einstein avec précaution.

EXCLUSIF

70 feuillets entrés dans l'Histoire

Sciences et Avenir a eu le privilège de consulter un document exceptionnel : le manuscrit de la relativité restreinte dans sa version de 1912, conservé au musée d'Israël.

Le musée d'Israël, à Jérusalem, présente un trésor inestimable : les manuscrits de la mer Morte, les plus anciens textes bibliques connu. Mais il abrite un autre document historique qui, lui, demeure inaccessible au public : le manuscrit de la relativité restreinte de 1912*. C'est le plus ancien écrit scientifique d'Einstein qui ait été conservé. À cette date, Einstein l'envoie à l'université de Leipzig, qui le lui a commandé pour une sorte d'encyclopédie de la physique atomique. Mais ce n'est qu'en 1922 que l'éditeur est enfin prêt, et Einstein est depuis longtemps passé à autre chose... Le manuscrit, périmé à l'époque, est aujourd'hui passionnant. *« Tout d'abord, parce qu'il comporte une explication beaucoup plus détaillée de la relativité restreinte de 1905, à destination des autres scientifiques. Mais surtout, parce qu'il contient les prémisses de la réflexion d'Einstein sur la relativité générale »*, explique Hanoch Gutfreund, ancien président de l'Université hébraïque de Jérusalem.



Dans cette variante de la formule $E=mc^2$, le « L » (ancienne désignation de l'énergie) a été remplacé par un « E » plus explicite.

Les mains gantées, Ronit Sorek, la conservatrice des manuscrits, extrait avec précaution quelques feuillets de leur boîte. L'un d'eux contient une variante du fameux $E=mc^2$. *« On peut constater qu'il y a beaucoup de ratures »*, souligne-t-elle. De toute évidence, Einstein débute sa rédaction à Prague, où il séjourne en 1911. Puis, à partir du feuillet 47, il utilise une encre plus foncée et un nouveau papier, de fabrication suisse : c'est à Zürich que la suite du manuscrit a été rédigée. Or, c'est là qu'Einstein entame sa période la plus fertile. À partir de ce moment, il barre de larges passages, les réécrit, revient en arrière… Page après page, une véritable fenêtre s'ouvre ainsi sur le cerveau du savant au travail. Mais le manuscrit disparaît jusqu'à une vente aux enchères chez Sotheby's à New York, le 2 décembre 1987, lors de laquelle il est acquis par un mystérieux collectionneur, qui le remet sur le marché en 1995. C'est alors que le banquier Edmond Safra l'achète et l'offre à son ami Teddy Kollek, le maire de Jérusalem. Ce dernier considère le texte comme un trésor de l'Humanité, et entend le présenter à côté des manuscrits de la mer Morte. Mais contrairement au parchemin sur lequel ces derniers sont rédigés, le papier se dégrade à l'air et à la lumière, et l'on ne peut l'exposer qu'exceptionnellement. Quelques feuillets seront présentés au public en 2015.

* Un fac-similé, avec sa traduction (en anglais), est publié aux éditions George Braziller.

●●● *et ses opinions privées, beaucoup plus pragmatiques »*, explique l'historien.

Depuis la Première Guerre mondiale, Einstein s'affiche ainsi publiquement comme un fervent pacifiste. Mais quand Hitler arrive au pouvoir, pressentant la menace, il change d'avis. *« Lorsqu'un objecteur de conscience français, Albert Nahon, lui écrit à ce sujet, Einstein lui reproche de ne pas s'engager, en disant qu'il faudra se défendre. Nahon est très déçu, mais se range finalement à l'avis d'Einstein un an plus tard »*, raconte Richard Crockatt. Grâce aux archives, l'historien a également comparé les méthodes d'Einstein en matière de travaux scientifiques et de réflexion politique. *«Lorsqu'il traite un problème scientifique, il l'examine sous tous ses aspects, et sa réponse est toujours complexe. Quand il s'agit de questions politiques, en revanche, sa démarche est intuitive et il s'en tient là. »*

Les archives révèlent en tout cas un Einstein préoccupé du sort de ses contemporains. Installé à Princeton (États-Unis) en 1933, il aide bientôt les scientifiques menacés par les nazis à obtenir un poste aux États-Unis. Roni Grosz montre ainsi le fac-similé d'un « affidavit », un certificat par lequel Einstein se porte garant, en avril 1938, de Marietta Blau, spécialiste autrichienne de la radioactivité. Il parviendra à lui trouver un emploi au Mexique, la sauvant d'une mort certaine.

Consulter les archives permet de démolir un mythe tenace : celui d'un Einstein mauvais élève. Pour le démontrer, Roni Grosz exhibe un fac-similé du relevé de notes de l'élève Einstein datant de 1896. Alors âgé de 17 ans, il a quitté l'Allemagne dont il ne supportait pas le système scolaire trop rigide et poursuit sa scolarité au lycée d'Aarau, en Suisse. *« En Suisse, les notes vont de 6 pour excellent à 1 pour mauvais. En Allemagne, c'est exactement le contraire. Regardez ce bulletin de notes : tout le monde l'a interprété comme un relevé de notes allemand et déduit qu'Einstein était un mauvais élève ! »*, s'amuse Roni Grosz. Sur l'échelle suisse, les notes d'Einstein, en particulier en sciences, sont en effet de 6 ou 5. C'était donc un excellent élève… mais un insoumis.

On le constate en parcourant les volumes de sa bibliothèque privée exposée dans la salle de consultation des archives. S'y trouvent des pacifistes et des rebelles comme Gandhi, le philosophe indien Rabindranath Tagore ou le mathématicien et philosophe anglais Bertrand Russell, mais aussi le classicisme allemand de Goethe, une biographie de Marie Curie, avec laquelle il a beaucoup correspondu… Et on se prend à imaginer qu'Einstein a puisé dans ces ouvrages des idées, une inspiration scientifique ou philosophique… *« Il ne s'est jamais plié à une autorité scientifique ou morale,* conclut Hanoch Gutfreund. *C'est cela qui a fait sa force ».* ■

COURTESY R. CROCKATT

« Lorsqu'il traite un problème scientifique, sa réponse est toujours complexe. Pour les questions politiques, en revanche, sa démarche est intuitive et il s'en tient là » **Richard Crockatt, historien**

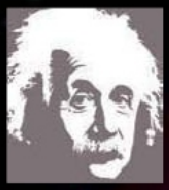
Einstein, homme à tout vendre

Le 14 mars 1951, jour de son soixante-douzième anniversaire, un Einstein facétieux tire la langue devant l'objectif. Depuis, comme bien d'autres représentations du « génie », la photo orne des tasses, des t-shirts, des livres, jeux et gadgets divers… que l'Université hébraïque de Jérusalem répertorie soigneusement. Car c'est elle qui détient les droits d'exploitation de l'image d'Einstein. Elle les cède gracieusement sur demande pour des utilisations à but éducatif, mais perçoit en revanche des redevances pour leur utilisation commerciale. Combien cela rapporte-t-il chaque année ? Silence gêné de Roni Grosz, le conservateur des archives d'Albert Einstein. Une somme significative, admet-il enfin. Et pour cause : selon des journaux israéliens, cette manne a pu atteindre plusieurs millions de dollars par an, même s'il semble qu'elle se tarisse. Récemment, l'Université hébraïque a ainsi autorisé une firme chinoise à baptiser son lait pour bébé « Einstein Milk », *« ce qui sous-entend en quelque sorte que l'enfant qui boit ce lait aura le développement cérébral d'Einstein »*, explique Roni Grosz. Quand on sait qu'Einstein aimait peu s'exposer publiquement, sauf pour des causes qui lui tenaient à cœur… L'Université a en revanche traîné en justice en 2012 la firme General Motors qui, pour vendre un de ses véhicules, avait représenté sans autorisation un Einstein bodybuildé arborant un tatouage « E = mc² », assorti du slogan : *« Les idées aussi, c'est sexy. »* Et c'est GM qui a gagné ! Les juges de Californie ont considéré que plus de cinquante ans après sa mort, il était raisonnable qu'Einstein entre dans le domaine public en tant que figure universelle.

Laurent Seksik, *Albert Einstein,* Folio, 2008

Albert Einstein, *Comment je vois le monde,* Flammarion, 2009

1. 2000 documents sont consultables sur www.alberteinstein.info.
2. Texte majeur du judaïsme, qui donne lieu à de très nombreux commentaires et études.
3. *The Road to Relativity*, Cambridge University Press, à paraître.



En **1918**, Einstein estime qu'un déplacement de masse en un point de l'Univers génère une onde à travers l'espace. En **2015**, le radiotélescope de Nançay traque les pulsars pour repérer les plus amples de ces vagues.

Témoins des frissons de l'espace-temps

REPORTAGE D'AZAR KHALATBARI À NANÇAY (CHER)

Tout commence en 1918. Cette année-là, Albert Einstein écrit un article dans lequel il prédit que tout déplacement de masse – de manière non symétrique – en un point de l'Univers doit créer une vague qui se propage à travers le cosmos, Système solaire et Terre compris. Au passage de cette onde gravitationnelle, une portion de l'espace se dilaterait puis se contracterait avant de retrouver sa taille initiale. Einstein se contente d'estimer la hauteur de cette vague invisible, jugeant au passage qu'elle ne pourra probablement jamais être observée. Mais il en a trop dit pour que des générations de physiciens ne soient pas tentés de s'engouffrer dans la brèche et ne se mettent en quête de ce graal gravitationnel. Depuis les années 1960, ils s'acharnent donc à en détecter toutes les variantes, et par tous les moyens.

En Toscane, les interféromètres sophistiqués de Virgo *(lire pp. 30-34)* sont à l'écoute des cataclysmes cosmiques : fusion d'étoiles très denses ou de trous noirs, supernovae… Des phénomènes qui émettent des ondes de haute fréquence : entre 10 et 1 000 Hz. Le radiotélescope de Nançay (Cher) tente, lui, de détecter des ondes à basse fréquence (10^{-8} Hz), générées par des sources bien plus tranquilles : des systèmes de deux énormes trous noirs tournant l'un autour de l'autre selon une orbite très excentrique. Nichés au cœur de galaxies voisines, chacun de ces couples rassemble des milliards de fois la masse du Soleil et devrait, à raison d'un tour effectué en quelques années, faire vibrer l'espace en propageant d'amples vagues. *« Selon la relativité générale, ces systèmes continuent* ●●●

DANA BERRY/NASA/CHANDRA

Les pulsars millisecondes, issus de l'explosion d'une étoile, peuvent servir de balises pour détecter des ondes gravitationnelles. Ces astres sont si denses qu'ils déforment et attirent dans leur champ gravitationnel la matière issue d'un éventuel astre compagnon. Ce dernier, pris dans le champ de l'étoile très dense, perd progressivement son gaz, qui alimente le pulsar en énergie. Celui-ci tourne sur lui-même de plus en plus vite en émettant deux jets de matière le long de son axe de rotation.

ISMAEL COGNARD

Le radiotélescope de Nançay (Cher) est le quatrième le plus important au monde par sa surface collectrice.

●●● *à émettre des ondes gravitationnelles jusqu'à ce que leur orbite prenne la forme d'un cercle,* précise Ismaël Cognard, du Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E) d'Orléans. *La théorie précise en effet qu'un déplacement de masse symétrique ne peut émettre d'onde gravitationnelle. »*

Les lois de la mécanique céleste sont telles que les orbites finissent toujours par devenir circulaires. C'est donc une étape bien précise de la danse des trous noirs, la phase d'approche, que le radiotélescope de Nançay va devoir surprendre.

Mais comment ? Les observer directement est impossible. Heureusement, les astrophysiciens disposent de repères qui vont dévoiler leurs mouvements : une certaine catégorie de pulsars (étoiles à neutrons très denses), appelés « pulsars millisecondes ». *« Des objets étonnants,* décrit David Smith, du Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan, de passage à Orléans ce jour-là. *Une fois et demie la masse du Soleil regroupée dans une sphère de vingt à trente kilomètres de diamètre – c'est-à-dire la taille de Paris – et tournant à 30 000 tours/minute, soit dix fois plus vite qu'un moteur de Clio ! »* Ces étoiles très particulières ont été découvertes en 1982, soit plus de trente ans après la disparition d'Einstein *(lire l'encadré ci-contre).* Elles devraient permettre d'apporter la confirmation tant attendue. *« Et ce pourrait être à Nançay ! »,* suggère Ismaël Cognard avec malice.

DAVID SMITH

« Un pulsar milliseconde, c'est une fois et demie la masse du Soleil regroupée dans une sphère de dix à vingt kilomètres de diamètre – la taille de Paris – et tournant à 30 000 tours/minute »

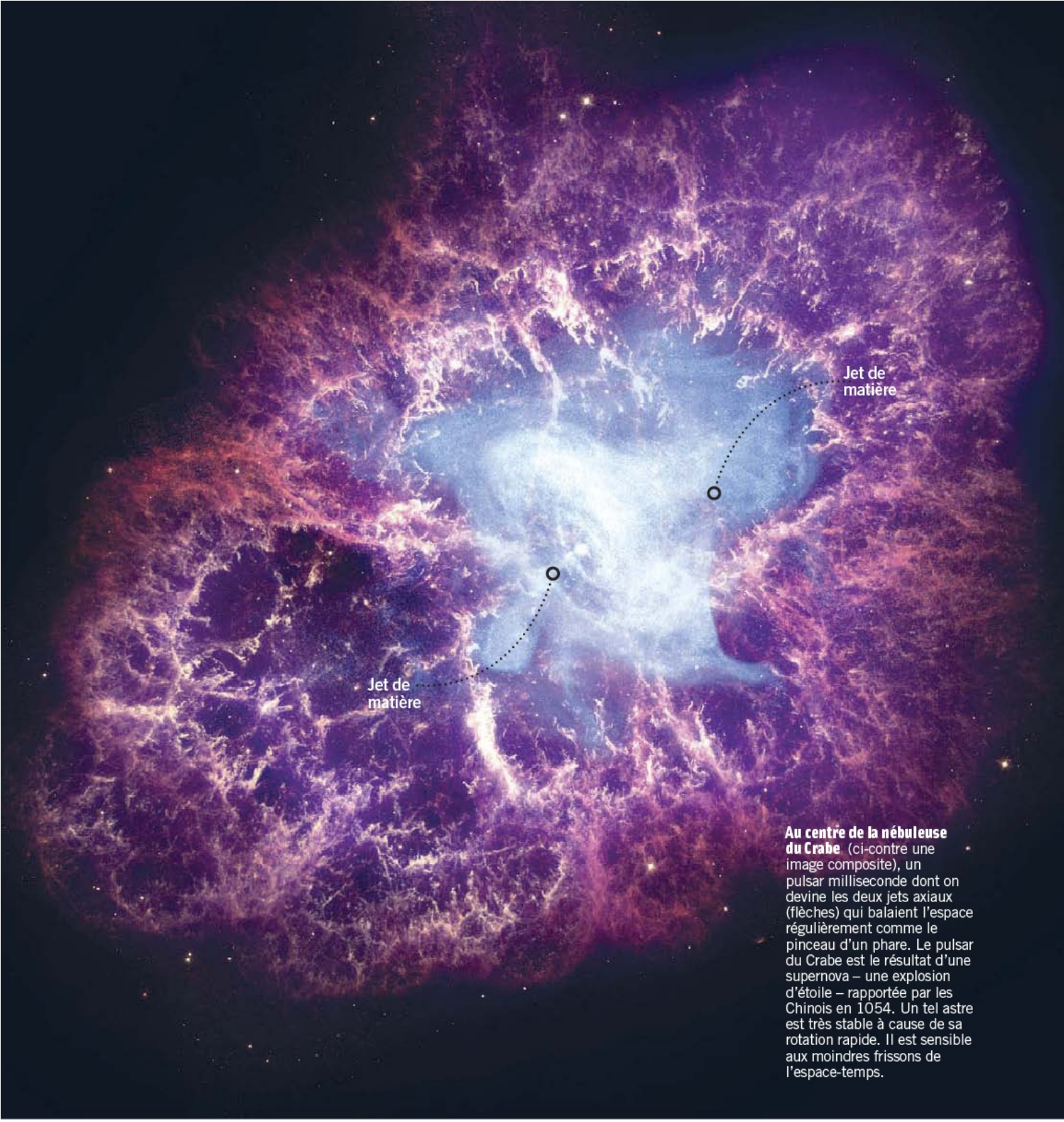
David Smith, Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan

Le pulsar recyclé, énergique et boulimique

En 1982, Donald Backer, de l'université de Californie à Berkeley, réalise une étonnante découverte. L'astre qu'il vient d'observer dans la constellation du Petit Renard tourne 642 fois sur lui-même en une seconde, soit un tour en 1,558 milliseconde. Une vraie toupie ! Jamais une telle bizarrerie n'a été observée. PSR B1937+21 demeure longtemps l'objet le plus rapide du ciel… jusqu'à la découverte en 2004 de PSR J1748-2446ad et ses 716 tours par seconde ! Une nouvelle classe d'objets célestes est née : les pulsars millisecondes – ou « pulsars recyclés ». Ce surnom est dû au scénario de leur formation : comme de nombreux astres, ils naissent au sein d'un système d'étoiles doubles. Or, dans un couple d'étoiles, la plus massive évolue toujours plus rapidement que sa compagne et finit par exploser en supernova. Ses enveloppes superficielles se trouvent éjectées, tandis que persiste son cœur dense qui forme un pulsar. Tournant sur lui-même, celui-ci émet un flot de rayons X et gamma, sous forme de deux jets polaires, et perd ainsi son énergie. Il tourne de moins en moins vite et finit par s'éteindre au bout de quelques millions d'années… Sauf si l'astre compagnon n'a pas été soufflé par l'explosion. Un cas rare. Situé près du pulsar très dense, piégé dans son champ gravitationnel, il perd alors progressivement son gaz. Le pulsar « grignote » ainsi peu à peu son « compagnon », ce qui lui fournit une nouvelle impulsion. Il ré-accélère jusqu'à atteindre des vitesses très élevées et devenir… un pulsar milliseconde.

Grille solognote

Au cœur de la Sologne s'ouvre en effet une bien curieuse clairière. Elle abrite une gigantesque grille métallique évoquant une structure d'art moderne. Cette « antenne » tournée vers les



Au centre de la nébuleuse du Crabe (ci-contre une image composite), un pulsar milliseconde dont on devine les deux jets axiaux (flèches) qui balaient l'espace régulièrement comme le pinceau d'un phare. Le pulsar du Crabe est le résultat d'une supernova – une explosion d'étoile – rapportée par les Chinois en 1054. Un tel astre est très stable à cause de sa rotation rapide. Il est sensible aux moindres frissons de l'espace-temps.

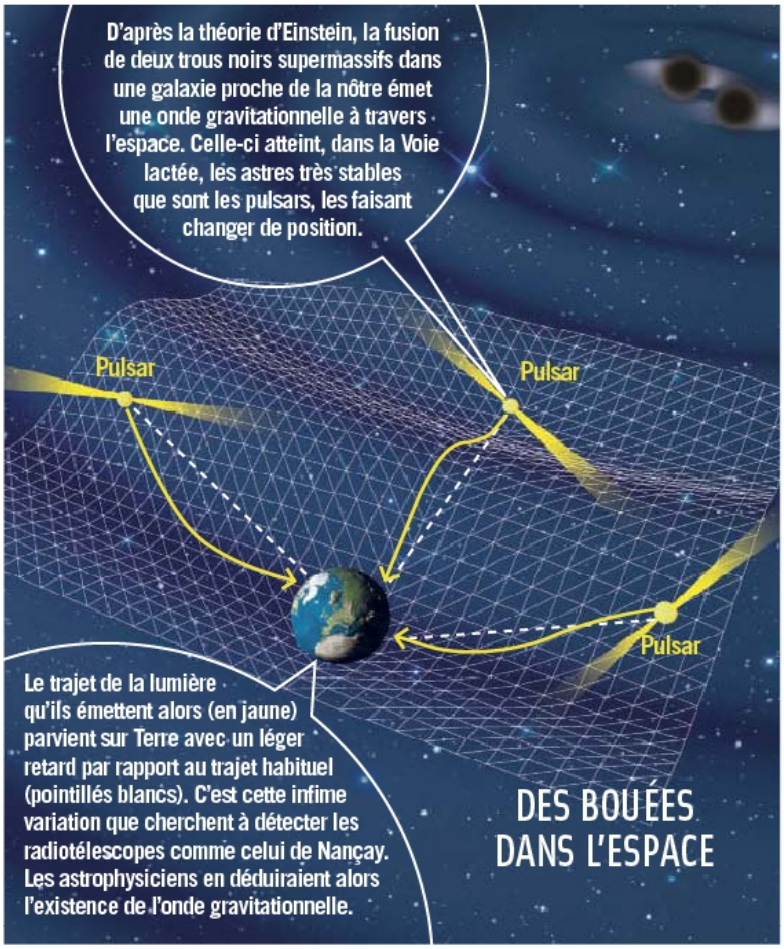
CHANDRA X-RAY OBSERVATORY

étoiles lointaines écoute jour et nuit une cinquantaine de pulsars millisecondes.

Ismaël Cognard emprunte souvent la route qui serpente à travers la forêt depuis Orléans, afin de récupérer les enregistrements pour les analyser. Ce qu'il traque, c'est… un retard de quelques dizaines de nanosecondes sur le temps que met la lumière des pulsars pour atteindre la grille solognote ! Un infime effet, mais qui serait le signe d'une très grande cause. Car ces fractions de seconde signifieraient que l'espace entre le pulsar et le radiotélescope s'est allongé de quelques mètres. Puis, les données devraient montrer que le signal arrive plus tôt de quelques nanosecondes, témoignant de la contraction de l'espace, et ainsi de suite, avant que tout redevienne normal, signe que l'onde tant attendue est passée. Cette détection « directe » du frisson cosmique – à Nançay comme en Italie – serait une première ! Car pour le moment, les astrophysiciens ne détiennent qu'une preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles *(lire l'encadré)*. ●●●

Un film d'animation de la Nasa (en anglais) : https://www.youtube.com/ mots clés : fermi

SOURCE : NASA/TOD STROHMAYER (GSFC), DANA BERRY (CHANDRA X-RAY OBSERVATORY)



MEHDI BENYEZZAR

La fusion de deux trous noirs supermassifs dans des galaxies voisines (ci-dessus vue d'artiste) émet des ondes gravitationnelles qui se propagent à travers l'espace, balayant aussi le Système solaire. Ces ondes font varier la géométrie de l'espace-temps.

Si les trous noirs qui émettent ces ondes se trouvent dans des galaxies voisines, les pulsars pointés par Ismaël Cognard et ses collègues se trouvent, eux, bel et bien dans la nôtre ; à quelques milliers d'années-lumière de la Terre tout de même. Leur atout majeur ? Une stabilité à toute épreuve conférée par leur rotation ultra-rapide. De vraies toupies, insensibles aux événements violents qui secouent la Voie lactée – explosions d'étoiles, expulsions de jets de matière ou de gaz soufflant tout sur leur passage, etc. – et rendraient impossible la détection des subtiles variations de distance causée par le frisson cosmique.

Le ronron des trous noirs

David Smith raconte, d'une façon très imagée, le principe d'observation utilisé à Nançay et sur les plus grands radiotélescopes du monde. *« Imaginons que nous soyons sur la côte d'Azur… Nous guettons les vagues qui arrivent de loin, depuis l'Afrique ou Gibraltar. Pour les repérer, nous avons eu la bonne idée de larguer quelques bouées au large,*

et nous les observons attentivement. Lorsque celles qui sont le plus à droite bougent en premier, nous en concluons qu'une onde en provenance de Gibraltar est en train de nous parvenir. Si ce sont les bouées de gauche qui tanguent d'abord, alors une vague lointaine nous arrive des côtes tunisiennes. Sans ces bouées, nous ne saurions pas détecter les ondes qui viennent d'aussi loin. »
Selon cette configuration « maritime », le couple de trous noirs qui ronronne au loin en faisant vibrer l'espace-temps est situé quelque part au-delà de l'horizon. Et dans le rôle des bouées, au large, les pulsars millisecondes constituent des repères sur le trajet des ondes. Facile à imaginer, mais difficile à réaliser ! Car ces perles rares ne courent pas les cieux.

Bonne fée cosmique

À ce jour, et malgré tous les efforts déployés, les astrophysiciens n'en ont repéré que 200… Et seules quelques dizaines d'entre elles – en fonction de leur distance à la Terre, de leur répartition et de leur stabilité – peuvent servir de balises pour les observations menées à Nançay. Bien peu aux yeux des radioastronomes, qui ont demandé à la Nasa de leur prêter main-forte. Depuis juin 2008, le télescope spatial Fermi scrute ainsi les rayons gamma qu'émettent les pulsars. Il a déniché quelques dizaines de « bouées » supplémentaires, dont trois sont déjà suivies à Nançay.
Reste que si ces balises cosmiques ultrastables sont fixes, pour mesurer une variation d'un mètre sur une distance de dix milliards de milliards de mètres (1 000 années-lumière, environ = 10^{19} m), il faut aussi que la grille solognote ne change pas de position. Or, *« la Terre est animée de nombreux mouvements imbriqués dans le Système solaire »*, reprend Ismaël Cognard.
C'est pourquoi il faut retrancher les mouvements de notre planète de toutes les données. Ce qui pourrait sembler un horrible casse-tête au commun des mortels est en fait une spécialité française que l'IMCCE – l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, à l'Observatoire de Paris – maîtrise particulièrement. Une aubaine : chaque sonde spatiale – grâce au signal qu'elle envoie vers le globe – permet de contribuer à ce travail de titan. En comparant les signaux de tous ces voyageurs de l'espace, la position de la Terre est définie au centimètre près.
Et pourtant ! Malgré toutes ces subtilités techniques utilisées depuis vingt ans… aucun signal n'a été encore détecté. *« Il nous faut bien plus de pulsars à surveiller ! »*, estime le chercheur. Pour compenser l'immensité de l'Univers. Car, à moins qu'une bonne fée cosmique ne se penche sur Nançay, l'onde envoyée par le ballet de trous noirs lointains serait tellement faible qu'il faudrait absolument la détecter avec plusieurs instruments. L'idéal serait donc de disposer d'un maillage de « bouées-pulsars » tout autour de la Terre et de plusieurs radiotélescopes sur tous les continents. Justement, depuis 2011, s'est constitué un réseau international de sept observatoires (International Pulsar Timing Array) – Arecibo et Green Bank (États-Unis), Westerbork (Pays-Bas), Parkes (Australie), Lovell, dans le Cheshire (Grande-Bretagne), Effelsberg (Allemagne) et Nançay – dont l'objectif est de mesurer les variations de distance des pulsars millisecondes les plus stables. Afin que les prochaines ondes gravitationnelles ne passent plus… sans faire de vagues. ■

COURTESY I. COGNARD

« L'onde envoyée par le ballet de trous noirs lointains est tellement faible qu'il faudrait plus de pulsars à surveiller et des radiotélescopes sur tous les continents » **Ismaël Cognard, LPC2E, Orléans**

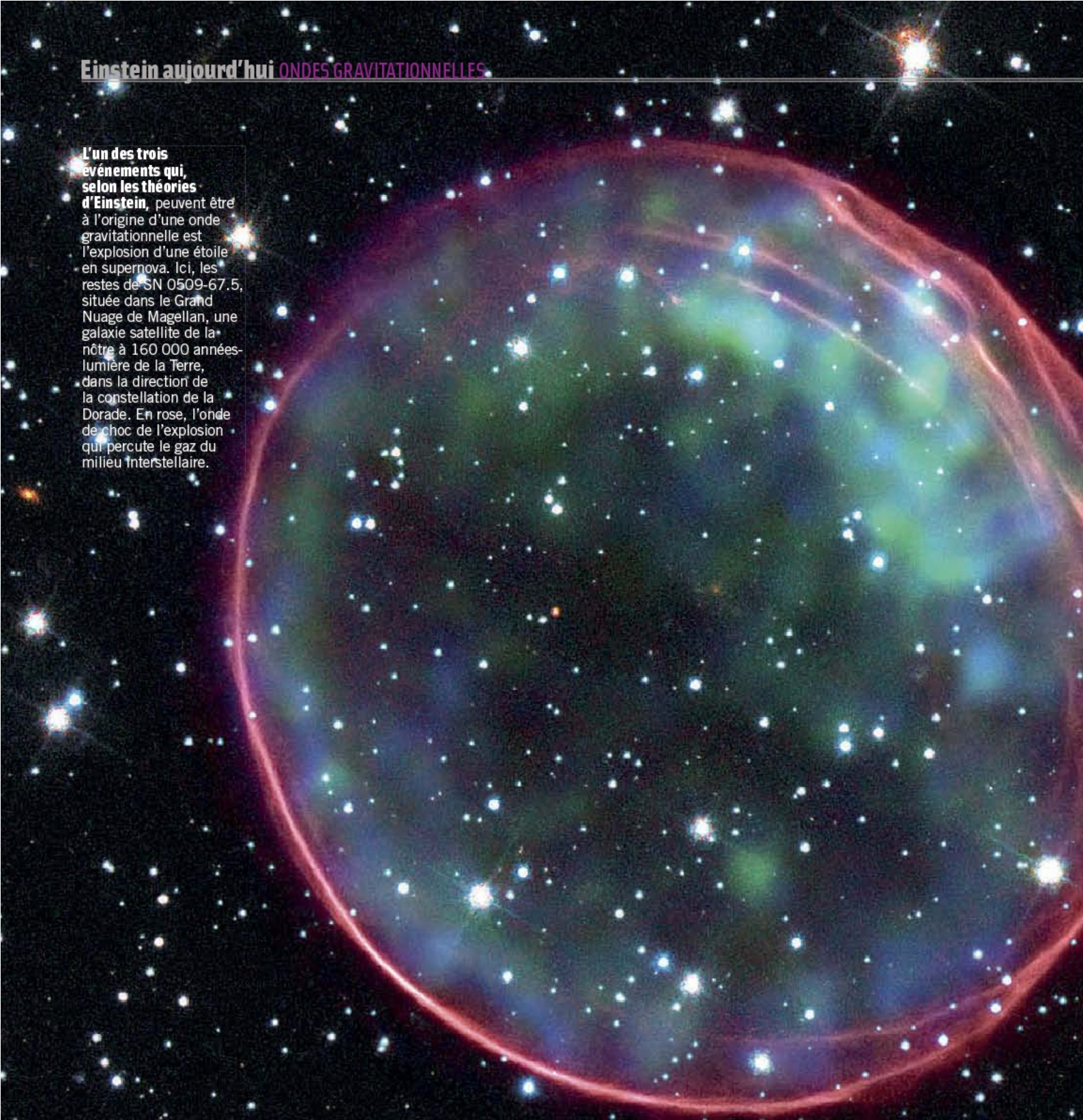
Deux Nobel pour une valse…

C'est peut-être le couple le plus célèbre de notre galaxie. Niché dans la constellation de l'Aigle, PSR B1913+16 a été découvert en 1974 par deux astrophysiciens de Princeton, Russell Hulse et Joseph Taylor, depuis le radiotélescope d'Arecibo à Porto Rico. Il s'agit de deux pulsars tournant l'un autour de l'autre en 7 à 8 heures seulement. Une durée qui permet de mesurer précisément les variations de l'orbite des deux astres. Dès leur découverte, les deux astronomes surveillent donc les pulsars et observent que leur période de rotation diminue. Ils se rapprochent, comme s'ils allaient s'écraser l'un sur l'autre. D'après les calculs théoriques fondés par la relativité générale et effectués par Thibault Damour, aujourd'hui à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), cette diminution de la période de rotation était estimée à 75 millionièmes de seconde par an, et devait correspondre à l'énergie perdue sous forme d'onde gravitationnelle. Or, la diminution de la période mesurée par Hulse et Taylor est de 76 millionièmes de seconde, avec une incertitude de 2 millionièmes de seconde seulement. Un accord parfait qui autorisa la construction des détecteurs d'ondes gravitationnelles… Et valut aux deux chercheurs américains le prix Nobel de physique en 1993.

UNIVERSITÉ DE PHYSIQUE DE FRANCFORT

Russell Hulse et Joseph Taylor ont mis en évidence l'existence des ondes gravitationnelles.

■ TOUT SAVOIR SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
dans les Repères pp. 46 à 49

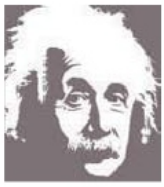


L'un des trois événements qui, selon les théories d'Einstein, peuvent être à l'origine d'une onde gravitationnelle est l'explosion d'une étoile en supernova. Ici, les restes de SN 0509-67.5, située dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie satellite de la nôtre à 160 000 années-lumière de la Terre, dans la direction de la constellation de la Dorade. En rose, l'onde de choc de l'explosion qui percute le gaz du milieu interstellaire.

En attendant la **vague cosmique**

REPORTAGE D'AZAR KHALATBARI AU DÉTECTEUR D'ONDES GRAVITATIONNELLES VIRGO À PISE (ITALIE)

NASA/ESA/THE UBBLE HERITAGE TEAM



En **1918**, Einstein prévoit l'existence des ondes gravitationnelles. En **2015**, Virgo tend ses bras pour capter les plus courtes, émises par des cataclysmes cosmiques.

Lorsque le temps est gris comme en ce jour d'automne, le tunnel en tôle qui court sur trois kilomètres à travers la campagne toscane se confond avec le ciel et la terre. Il faut alors se fier aux panneaux indicateurs pour parvenir, par des routes cabossées, jusqu'à Virgo. Le détecteur d'ondes gravitationnelles européen, principalement porté par l'Italie et la France, est installé dans les faubourgs de Pise. Le bâtiment central et ses deux longs bras, qui n'ont pourtant rien d'un palais florentin, font l'objet de la fierté des habitants du cru, du chauffeur de taxi à la patronne de l'hôtel où les images de Virgo côtoient les tableaux champêtres. Et sans vraiment en comprendre grand-chose, chacun sait que les opérations qui s'y déroulent ont un rapport avec le célèbre Albert Einstein…

À juste titre: ce que tente d'observer Virgo a été prédit par le grand homme. En 1918, celui-ci expliquait en effet que, selon la relativité générale *(lire pp. 46-49)*, tout déplacement de masse en un point de l'Univers devait provoquer une onde gravitationnelle, c'est-à-dire une oscillation de l'espace-temps se propageant à travers tout l'espace, Système solaire – et donc Terre – compris.

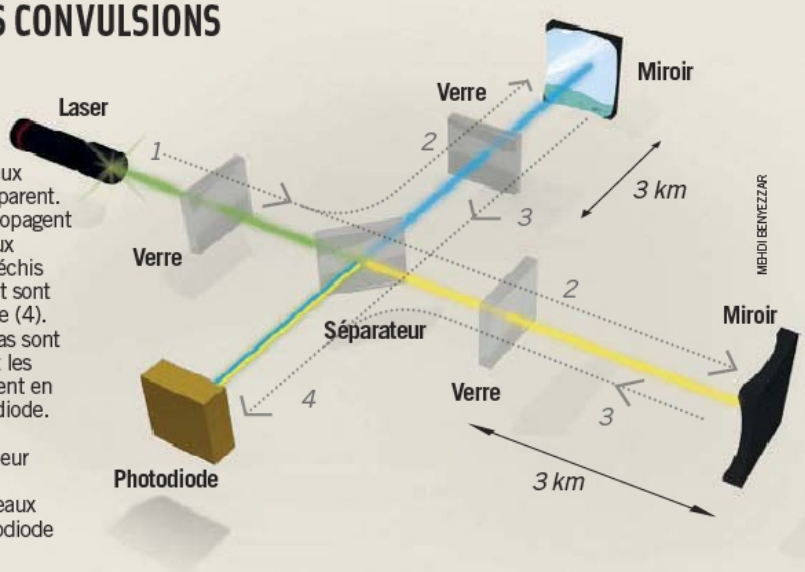
Sur la foi de cette hypothèse, les physiciens se sont lancé un défi aussi subtil que complexe: repérer directement cette imperceptible « vague cosmique » et confirmer ainsi la relativité générale. Certes, la théorie a été déjà validée à plusieurs reprises dans le Système solaire *(lire aussi pp. 24-29)*, *« mais jamais dans l'espace lointain ni dans un champ gravitationnel si intense que celui qui règne à proximité d'un trou noir »*, précise Benoît Mours, astrophysicien au Lapp, Laboratoire de physique des par- ●●●

■ TOUT SAVOIR SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
dans les Repères pp. 46 à 49

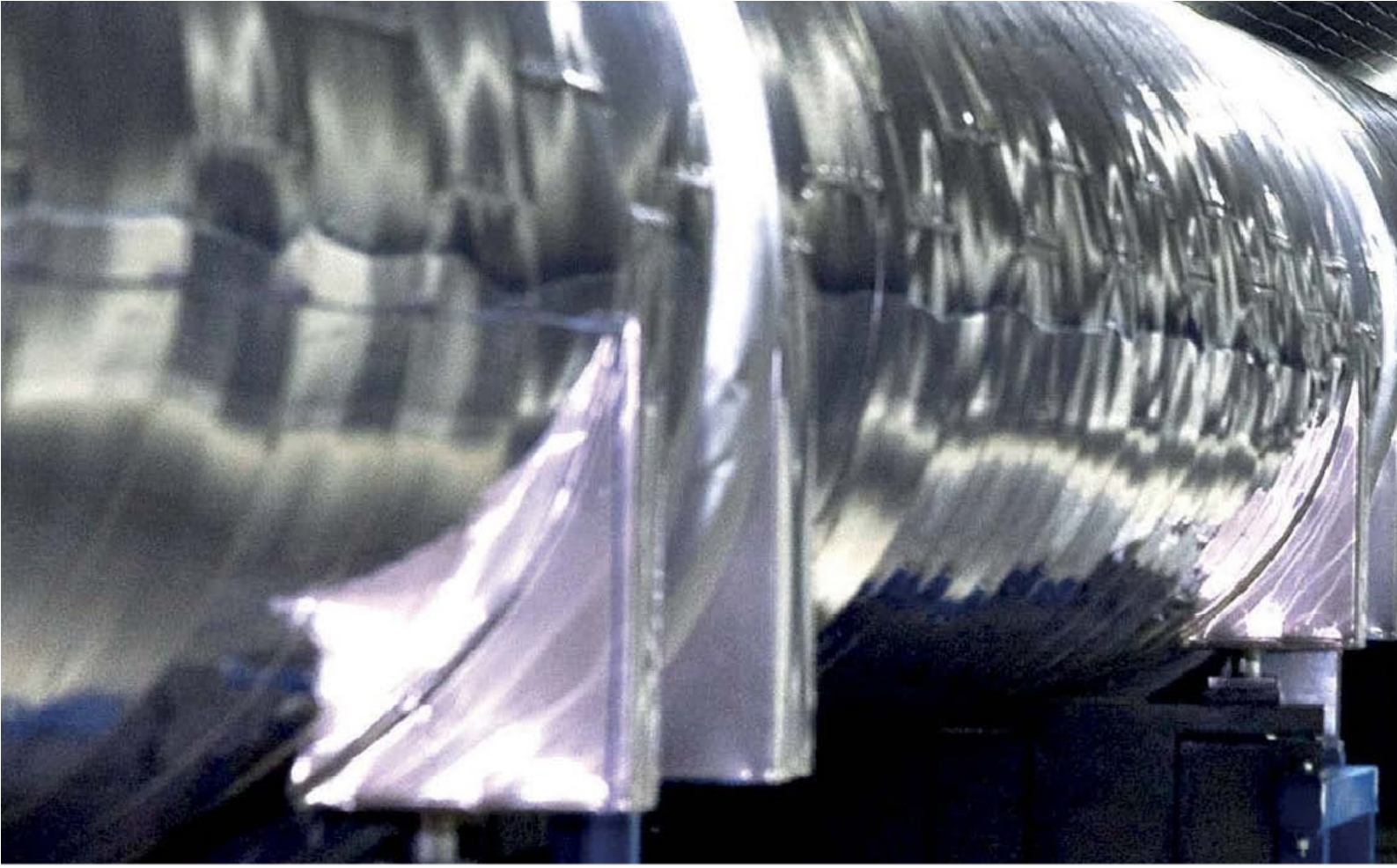
INFN

À L'ÉCOUTE DES CONVULSIONS DE L'UNIVERS

Dans le tunnel de Virgo, un faisceau laser (1) est divisé en deux par un miroir semi-transparent. Les deux faisceaux se propagent le long des bras jusqu'aux miroirs (2). Une fois réfléchis (3), ils se recombinent et sont dirigés vers la photodiode (4). En temps normal, les bras sont de longueur identique et les deux faisceaux parviennent en même temps à la photodiode. Au passage d'une onde gravitationnelle, la longueur des deux bras varierait différemment. Les faisceaux parviendraient à la photodiode avec un décalage.



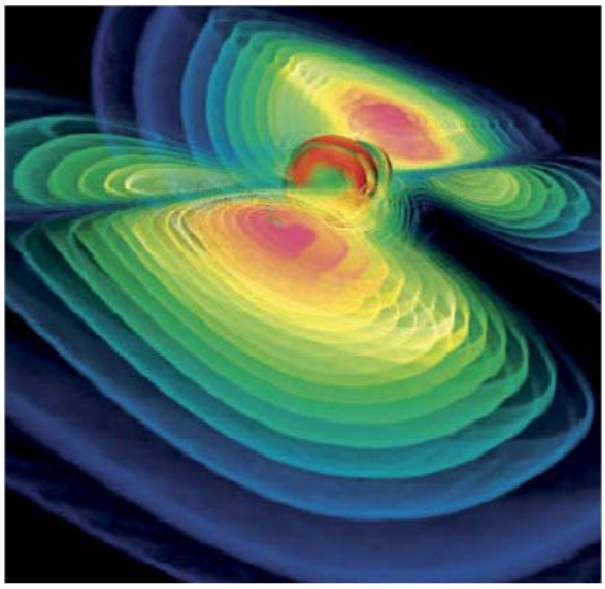
MEHDI BENYEZZAR



●●● ticules, à Annecy-le-Vieux. Or, les seuls phénomènes cosmiques capables d'envoyer une telle onde sont des événements cataclysmiques au mouvement asymétrique.

Les théoriciens en ont désigné trois comme des cas d'école. Le premier survient lorsque deux étoiles très denses, comme des étoiles à neutrons ou encore des trous noirs, se rapprochent l'un de l'autre et forment un système binaire. Alors, inexorablement, pris dans leur intense champ gravitationnel, ils tournoient de plus en plus vite – jusqu'à 1 000 tours par seconde, 30 % de la vitesse de la lumière. Avec pour point d'orgue une coalescence – une fusion – qui fait vibrer l'espace tout entier. Dans notre Voie lactée, ce phénomène reste très rare (tous les mille à un million d'années). Mais la chance de le surprendre augmente avec le nombre de galaxies observées.

Le second cas est consécutif à la mort d'une étoile massive au cours d'une explosion – ou supernova. Les couches superficielles de l'étoile se trouvent éjectées, tandis que le cœur s'effondre et devient un astre dense. Ces deux événements ne surviennent qu'une fois dans la vie de l'astre.



NUMERICAL RELATIVITY GROUP, FSU JENA

La fusion de deux étoiles à neutrons dans une galaxie proche de la nôtre créerait une onde qui parviendrait jusqu'à nous.

Le troisième phénomène pouvant selon toute probabilité répandre dans l'espace des vagues gravitationnelles est un objet digne d'un poème de Robert Desnos : un pulsar – une étoile à neutrons très dense – d'environ dix kilomètres de rayon, à la surface duquel s'élèverait une montagne de moins d'un millimètre ! Foi d'astronome, contrairement à une fourmi de 18 mètres, ce genre d'objet existe probablement. À cause de la minuscule asymétrie formée par la petite éminence, il produirait même un signal périodique, se renouvelant tous les quelques dixièmes de fraction de seconde à quelques secondes. Car le pulsar est un objet qui tourne très vite sur lui-même. « *Ce faisant, il perd une partie de son énergie, sous forme de rayonnements X et gamma à hauteur de plus de 90 %, et à quelques pourcents sous forme d'ondes gravitationnelles* », raconte Éric Gourgoulhon du Luth (laboratoire l'Univers et ses théories) à l'Observatoire de Paris à Meudon.

Une bonne dose d'optimisme

Reste que les théoriciens qui ont calculé et reconstitué le comportement de ces trois phénomènes n'ont toujours pas fourni la méthode pour les attraper ! Sur le papier et dans les équations, tout semble simple : au passage de l'onde, l'espace se déformerait, et la distance entre deux points augmenterait puis diminuerait avant de reprendre, une fois l'onde passée, sa valeur initiale. Ainsi, sur Terre, une barre de métal ou un quelconque objet s'allongerait, se rétrécirait, puis retrouverait

Au passage d'une onde gravitationnelle, la longueur du tunnel de Virgo diminuerait de 10^{-19} m, soit une distance un milliard de fois inférieure au rayon d'un atome.

INFN

sa taille, un peu comme si la distance entre chaque atome avait subi les variations de l'espace. Ce n'est pas par inattention que nul n'a remarqué cette expérience décoiffante… mais plutôt parce que la variation est infime. Donc, plus l'objet que l'on observe est grand, plus la variation est importante. D'où l'intérêt des longs bras de Virgo. *« Chaque bras, qui fait trois kilomètres de long, devrait ainsi diminuer de 10^{-19} m,* précise Benoît Mours. *Autrement dit: un dix-milliardième de milliardième de mètre, soit une distance un milliard de fois inférieure au rayon d'un atome! »*

Voilà le défi lancé aux physiciens – sans doute avec un clin d'œil taquin – par le grand Albert! Pour prouver que l'Univers était réellement tel qu'il l'a décrit, ceux-ci ont dû déployer des trésors d'ingéniosité, et parfois une bonne dose d'optimisme. Ainsi de l'expérience de Joseph Weber, de l'université du Maryland aux États-Unis, qui imaginait que des cylindres de plus d'une tonne suspendus dans le vide auraient pu vibrer au passage de la vague. Las! Il a pensé avoir capté cette vibration, mais malgré la publication d'un article, en 1968, l'expérience n'a jamais pu être reproduite… Aujourd'hui, tout le monde reconnaît qu'elle n'aurait pas permis de mesurer ces infimes dilatations. La description intime du monde n'est pas à la portée du premier cylindre venu!

BENOÎT MOURS

« La théorie n'a jamais été validée dans l'espace lointain »

Benoît Mours, astrophysicien au Laboratoire de physique des particules, Annecy-le-Vieux

Surchausses et bonnets

À Pise, on utilise un interféromètre laser *(voir l'infographie p. 31)*. Son principe : deux faisceaux laser, formant un angle droit, courent sur trois kilomètres chacun. Imaginons qu'une onde passe à travers l'instrument. Selon la direction d'où elle vient, l'un des bras s'allonge puis se contracte, l'autre restant inchangé. Ou bien les deux s'allongent et se contractent, mais différemment. Le temps de l'aller-retour du faisceau laser qui mesure la longueur de chacun des bras est donc différent. Si l'on soustrait ces deux mesures de temps, il reste un petit signal témoin du passage de l'onde gravitationnelle. *« Mais pour atteindre cette précision, il faut éliminer toutes les sources parasites. Et il y en a!* déplore Benoît Mours. *Certaines sont prévisibles, comme les microséismes, les marées continentales, le vent ou la circulation d'eau des profondeurs… D'autres non: du passage de trains et d'avions – l'aéroport de Pise n'est pas loin – aux vibrations provoquées par les coups de fusil des chasseurs qui arpentent les environs! »* Du coup, même si le principe de l'expérience est simple, sa mise en œuvre a nécessité des années de réglages… Par exemple, les optiques sont suspendues pour échapper aux vibrations du sol. Et dans les salles blanches, on traque la moindre poussière. Quant aux deux tunnels, on n'y circule que paré de surchausses et de bonnets…

Malgré toutes ces précautions, le très attendu frisson cosmique n'a toujours pas été piégé! Ni sur Virgo, ni sur les deux sites américains du Ligo, Livingston (en Louisiane) et Hanford (dans l'État de Washington) : un détecteur d'ondes gravitationnelles qui fonctionne sur le même principe que Virgo, mais avec des bras de quatre kilomètres de long. Rien. *« Mais nous n'avons jamais été aussi près du but! »*, affirme Benoît Mours. La raison de son enthousiasme s'appelle « Advanced Virgo » ou « Virgo avancé ». *« D'ici 2016,* précise le chercheur, *notre détecteur sera nettement amélioré,* ●●●

INFN

L'un des deux miroirs de Virgo qui réfléchissent le faisceau laser. Pour éviter les plus minimes perturbations, ils sont suspendus à de gigantesques amortisseurs.

●●● *avec un faisceau dix fois plus puissant, de sorte que nous serons capables de recevoir des signaux issus d'une portion d'espace mille fois plus importante qu'aujourd'hui. Nous attendons ainsi, statistiquement, environ quarante événements par an. »*

Un Big Dog créé de toutes pièces

De son côté, Ligo a lui aussi subi des améliorations : « Advanced Ligo » dispose aujourd'hui d'une sensibilité multipliée par dix. Les deux détecteurs – qui travaillent désormais « main dans la main » – sont donc prêts pour l'arrivée de la vague…

Personne n'a oublié le 16 septembre 2010 où la fine équipe, de part et d'autre de l'Atlantique, a bien cru au jour de gloire. L'un des signaux enregistrés ressemblait en effet à s'y méprendre à celui qu'aurait pu provoquer une onde gravitationnelle émise par la coalescence d'un système binaire ! Il semblait provenir de la direction de la constellation du Grand Chien, qui contient l'étoile la plus brillante du ciel après le Soleil, Sirius. Très vite, les membres de Virgo et de Ligo n'ont plus parlé que de ce « Big Dog » parvenu à leurs instruments. De septembre à mai, l'euphorie fut à son comble, et un article scientifique préparé. En toute logique, il aurait dû faire grand bruit, car il n'est pas déraisonnable de penser qu'un tel résultat soit digne du Nobel. Mais le soufflé s'est subitement dégonflé. Pourquoi ?

« Une commission interne à Virgo et Ligo doit donner son feu vert avant que l'article soit soumis à publication », explique Benoît Mours. Et c'est là que le pot aux roses a été découvert. *« Capter une onde gravitationnelle est si difficile que nous devons absolument nous préserver des faux-semblants »*, explique Loïc Rolland, lui aussi membre du Lapp. Du coup, afin de tester la vigilance des troupes et le bon fonctionnement des instruments, les deux expériences Virgo et Ligo ont opté dès le départ pour le système « d'injection aveugle », un crash-test sans pitié. *« Il s'agit de constituer un tout petit cercle d'initiés qui injectent de temps en temps, sans prévenir, un faux signal dans le système*, poursuit Loïc Rolland, lui-même membre de ce cénacle. *Nous devons garder le secret coûte que coûte. Cela fait partie des règles que nous nous sommes tous fixées. Ne rien révéler pour voir si les systèmes de détection de Virgo et Ligo fonctionnent correctement. »*

Le « Big Dog » qui a soulevé une telle joie était en fait une injection aveugle ! *« Il m'était difficile de côtoyer mes collègues au quotidien et d'être témoin de leur excitation tout en sachant que nous avions fabriqué ce signal de toutes pièces »*, reconnaît aujourd'hui Loïc Rolland. Mais au moins la procédure a-t-elle superbement fonctionné. Et si un nouveau chien se présente, cette fois-ci pour de vrai, c'est sûr, il sera piégé ! ■

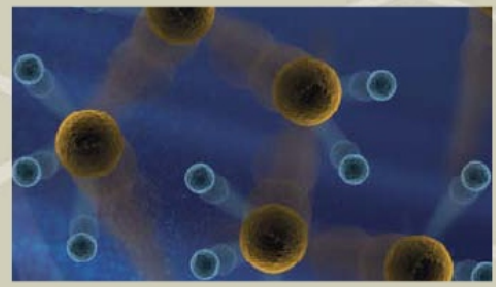
LOÏC ROLLAND

« De temps en temps, un tout petit cercle d'initiés injectent, sans prévenir, un faux signal dans le système »

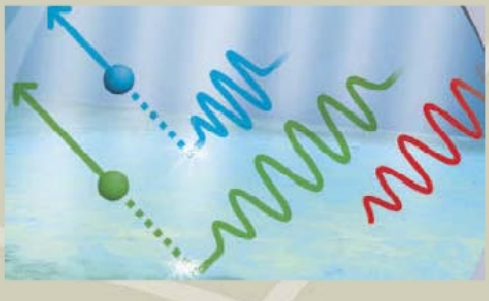
Loïc Rolland, chercheur au Laboratoire de physique des particules, Annecy-le-Vieux

LES GRANDES THÉORIES D'EINSTEIN

PAR FRANCK DANINOS
INFOGRAPHIES : MEHDI BENYEZZAR

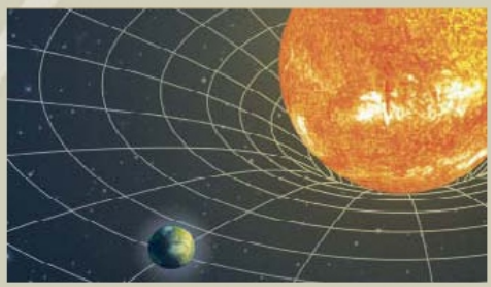


MOUVEMENT BROWNIEN
LE CHAOS BIEN ORDONNÉ DES PARTICULES P. 36



EFFET PHOTOÉLECTRIQUE
LA LUMIÈRE EST... QUANTIQUE ! P. 39

RELATIVITÉ RESTREINTE
LES PARADOXES DE L'ESPACE-TEMPS P. 42



RELATIVITÉ GÉNÉRALE
LES CHEMINS SINUEUX DE LA GRAVITATION P. 46

MOUVEMENT BROWNIEN

LE CHAOS BIEN ORDONNÉ DES PARTICULES

L'ESSENTIEL En expliquant pourquoi des molécules en suspension dans un liquide s'agitent de manière perpétuelle, Einstein met en évidence la réalité physique des atomes.

Avant Einstein

En 1827, sous son microscope, le botaniste écossais Robert Brown (1773-1858) observe un étrange ballet : des poussières de pollen qui zigzaguent et tournent parfois sur elles-mêmes à la surface de l'eau, sans jamais ralentir. Brown attribue d'abord cette frénésie au fait qu'elles sont dotées d'un mouvement propre. *« Mais en observant le même phénomène avec des plantes mortes et des particules inorganiques*, indique Jean-Pierre Kahane, mathématicien de l'Académie des sciences, *il écarte l'hypothèse et fait passer le problème des biologistes aux physiciens. »*

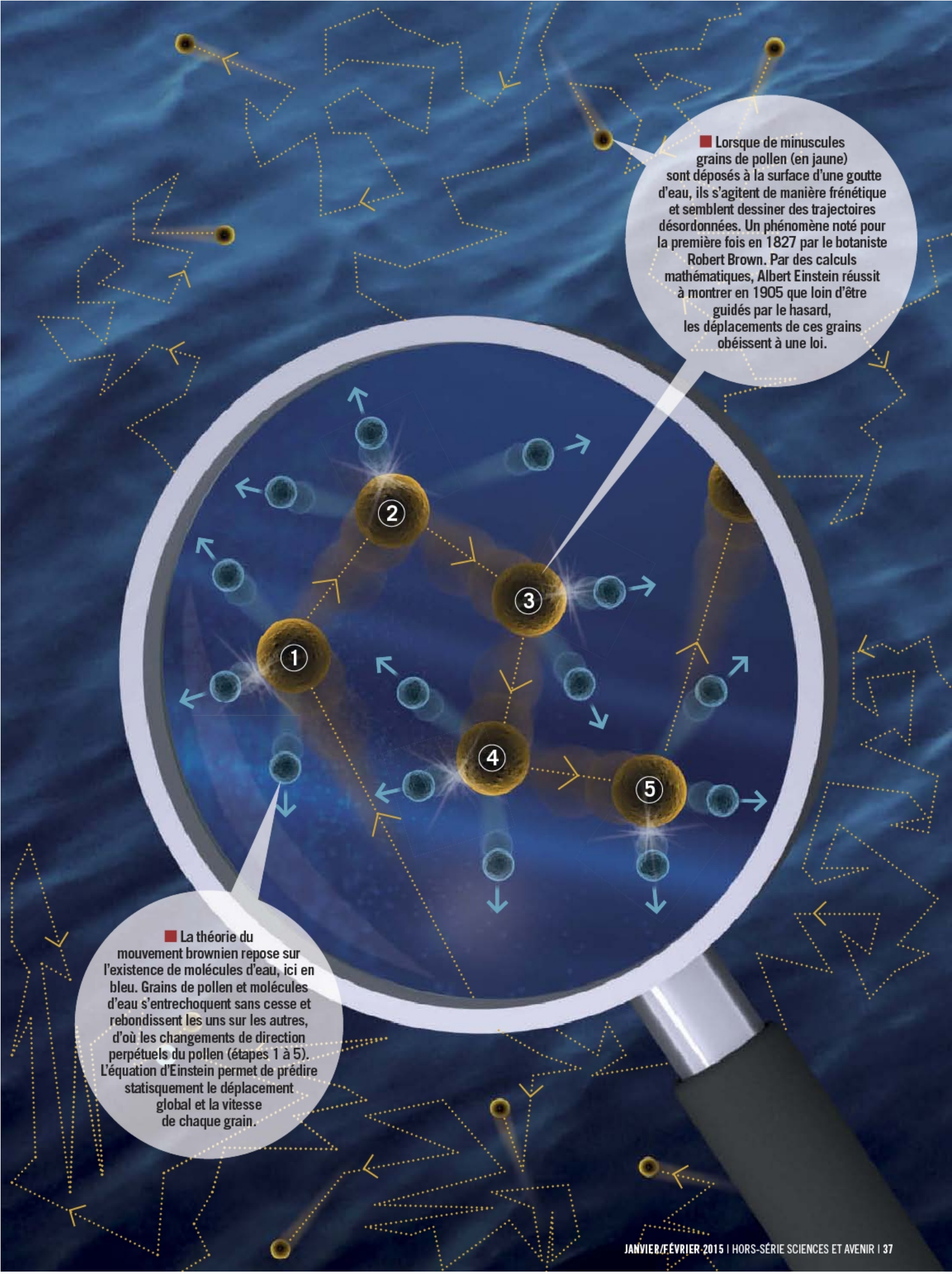
Ces derniers éliminent peu à peu toute théorie faisant intervenir une cause extérieure, telle la lumière du microscope. Certains acquièrent la conviction que ce « mouvement brownien » est lié aux liquides eux-mêmes et à leurs constituants, s'appuyant sur la « théorie cinétique des gaz » développée par Ludwig Boltzmann (1844-1906). Le physicien autrichien interprète en effet la pression et la température d'un gaz comme la conséquence du mouvement ininterrompu de myriades d'atomes et de molécules, briques élémentaires de la matière dont on suppose l'existence depuis l'Antiquité. La pression d'un gaz résulterait de la collision des atomes sur une paroi ; et sa température serait une mesure de l'énergie moyenne que leur confère leur mouvement, l'« énergie cinétique ». Appliquée aux liquides, la théorie cinétique expliquerait qu'en s'entrechoquant de façon constante et désordonnée, les molécules d'eau entraînent dans leur valse de plus grosses particules en suspension, telles le pollen.

Mais l'explication peine à convaincre. En premier lieu, parce que l'existence des atomes n'est pas encore prouvée expérimentalement ! *« Nombre de scientifiques et de philosophes refusent de recourir à des entités non accessibles à l'expérience des sens, qui fragiliseraient la crédibilité de la science*, précise Martha Cecilia Bustamante, historienne de la physique à l'université Paris-Diderot. *Aux théories atomistes et discontinues de la matière, ils préfèrent les approches macroscopiques. La thermodynamique en particulier, éprouvée par deux siècles d'expériences, qui explique les échanges d'énergie dans les gaz et les liquides sans préjuger de leurs constituants. »*

L'autre raison est que les physiciens ne parviennent pas à établir une relation de proportionnalité entre la température des liquides et l'énergie cinétique des particules en suspension, comme le prévoit la nouvelle théorie. Cette énergie est calculée à partir des vitesses de déplacement des particules, en divisant la longueur des trajets observés par leur durée. Or, pour une température donnée, l'énergie mesurée n'est jamais la même. Au début du xx[e] siècle, l'énigme posée par Robert Brown reste donc entière.

Danièle Ghesquier-Pourcin, Muriel Guedj, Gabriel Goha et Michel Paty, *Énergie, science et philosophie au tournant des xix[e] et xx[e] siècles,* Hermann, 2010

Vidéo-conférence de Jean-Pierre Kahane sur Paul Langevin et le mouvement brownien : http://tinyurl.com/louu6vo


Lorsque de minuscules grains de pollen (en jaune) sont déposés à la surface d'une goutte d'eau, ils s'agitent de manière frénétique et semblent dessiner des trajectoires désordonnées. Un phénomène noté pour la première fois en 1827 par le botaniste Robert Brown. Par des calculs mathématiques, Albert Einstein réussit à montrer en 1905 que loin d'être guidés par le hasard, les déplacements de ces grains obéissent à une loi.
1
2
3
4
5
La théorie du mouvement brownien repose sur l'existence de molécules d'eau, ici en bleu. Grains de pollen et molécules d'eau s'entrechoquent sans cesse et rebondissent les uns sur les autres, d'où les changements de direction perpétuels du pollen (étapes 1 à 5). L'équation d'Einstein permet de prédire statisquement le déplacement global et la vitesse de chaque grain.

Une particule brownienne ne se déplace pas comme une boule de billard, en ligne droite

La théorie

Le jeune Einstein est un fervent partisan de la théorie atomiste. Tout juste sorti de l'École polytechnique de Zurich, il cherche à étendre aux liquides les formules développées pour les gaz par Boltzmann, ainsi que des moyens de déterminer la taille des atomes et des molécules. Inspirée de sa thèse de doctorat *(lire l'encadré ci-dessous)*, une idée lui apparaît au début de l'année 1905. Même si les molécules d'un liquide sont trop petites pour être observées directement, Einstein réalise que leurs mouvements pourraient être détectés par les effets qu'ils provoquent sur de plus grosses particules en suspension. Cela, sans connaître précisément les observations de Brown. *« À sa manière,* souligne Jean-Pierre Kahane, *et en développant sa propre mécanique statistique, Einstein réinvente ainsi le mouvement brownien ! »*

Il considère tout d'abord que de telles particules se comportent comme de « gros atomes » en équilibre thermodynamique avec ceux du liquide : elles reçoivent autant d'énergie qu'elles en communiquent elles-mêmes. Leur pression et leur énergie peuvent être calculées, tout comme la manière dont elles circulent dans le fluide. Ces particules sont freinées chaque fois qu'elles heurtent des atomes, et poussées lorsque ceux-ci les percutent. Pour caractériser leurs déplacements, Einstein combine alors deux approches complémentaires : l'une, déterministe, où la localisation des particules à un instant donné découle de leur état antérieur ; l'autre, probabiliste, adaptée à leur trajectoire chaotique et aux va-et-vient qu'elles effectuent au gré des collisions.

L'équation qui en résulte indique que la distance parcourue par une particule brownienne n'est pas proportionnelle à la durée du trajet, contrairement à ce qui se passe pour une boule de billard qui se déplace en ligne droite, mais à la racine carrée de cette durée. On comprend, dès lors, pourquoi les mesures de vitesse ne collaient pas avec la théorie. En divisant les distances par des durées, les expérimentateurs ne prenaient pas en compte les innombrables allers et retours des particules. Einstein calcule que des particules d'un micromètre de diamètre, visibles sous microscope, se déplaceraient de 0,8 micromètre en une seconde dans de l'eau à 17°C. En mai 1905, il propose ainsi la première théorie testable du mouvement brownien.

ROGER VIOLLET

UN DOCTORAT REFUSÉ DEUX FOIS

En 1901, Einstein soumet au professeur Alfred Kleiner, de l'université de Zurich (Suisse), un projet de thèse sur la nature des forces intermoléculaires. Jugé trop « conjectural », le sujet est refusé. Einstein en propose alors un autre, fondé sur la diffusion et la viscosité de l'eau sucrée, intitulé : « Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires ». Accepté, cette fois. Mais le physicien se voit vite contraint de retirer son dossier. Autant parce que Kleiner l'estime trop critique à l'égard de plusieurs sommités, que pour des raisons… financières. Les frais d'inscription s'élèvent en effet à 230 francs suisses, alors qu'il n'en gagne que 150 par mois pour ses cours donnés à des lycéens ! À l'été 1902, il accepte un poste au Bureau de la propriété intellectuelle de Berne et redépUne parose son dossier. Les équations de diffusion qu'il établit dans le cadre de son doctorat joueront un rôle capital dans l'élucidation du mouvement brownien. Et lui permettront de déduire la taille d'une molécule de sucre. Au printemps 1905, il présente son mémoire à Kleiner. Qui le refuse à nouveau, car… trop court ! Einstein ajoute alors une phrase à son manuscrit, que la prestigieuse revue *Annalen der Physik* décide de publier. Une parution décisive : l'année suivante, il obtiendra son doctorat !

Et après…

Les théories d'Einstein reçoivent un bon accueil. Surtout auprès des atomistes convaincus, comme le physicien Jean Perrin (1870-1942) qui entreprend d'en vérifier les prédictions. Il développe des techniques de centrifugation qui lui permettent d'utiliser des particules de tailles identiques. En 1908, Perrin constate que leur déplacement à la surface d'un liquide est bien proportionnel à la racine carrée du temps d'observation. D'autres mesures sont réalisées en modifiant la taille des particules ou la viscosité : les équations d'Einstein se vérifient à chaque fois. *« Cette concordance décisive ne peut laisser aucun doute sur l'origine du mouvement brownien,* écrira Perrin. *Le mouvement moléculaire nous est rendu visible. »*

La réalité physique des atomes est alors avérée, et la théorie cinétique repose désormais sur des bases indiscutables. Même si les travaux d'Einstein sur le mouvement brownien sont les moins connus du grand public, ils ouvriront la voie à une révolution tout aussi importante que la relativité. Ils établissent, en effet, l'importance des probabilités dans les lois de la physique. Et les équations relatives à ce mouvement, développées par les mathématiciens, permettront d'étudier des systèmes aussi complexes que variés – du repliement des protéines au trafic routier en passant par l'évolution des marchés financiers *(lire pp. 64-67)*.

EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

LA LUMIÈRE EST… QUANTIQUE !

L'ESSENTIEL Contre la science de son temps, Einstein soutient que le rayonnement lumineux se comporte non seulement comme une onde, mais aussi comme un ensemble de corpuscules à l'énergie quantifiée. Il explique ainsi des phénomènes étranges, tel l'effet photoélectrique.

Avant Einstein

Pendant des siècles, deux conceptions s'affrontent pour expliquer la nature de la lumière. L'une soutient qu'elle est une onde : une perturbation qui se propage de proche en proche dans un milieu tel que l'air ou l'eau. L'autre, défendue notamment par Newton, assimile la lumière à des corpuscules se déplaçant en ligne droite. Au début du XIXe siècle, c'est la théorie ondulatoire qui a le dessus. Le Britannique Thomas Young (1773-1829) découvre, par exemple, que deux faisceaux lumineux « interfèrent » lorsqu'ils se croisent. Ils se comportent comme des ondes dont les amplitudes augmentent ou diminuent lorsqu'elles se superposent, telles des rides à la surface d'un étang. En 1864, James Clerk Maxwell (1831-1879) montre que la lumière est un cas particulier d'onde électromagnétique – un phénomène oscillatoire dans lequel un champ électrique se transforme en champ magnétique lors de sa propagation, et vice versa. L'Allemand Heinrich Hertz (1857-1894) prouve que toutes les ondes électromagnétiques peuvent se réfléchir ou interférer comme des ondes lumineuses. La cause paraît alors entendue : la lumière est une onde électromagnétique dont l'énergie se propage de façon continue dans l'espace.

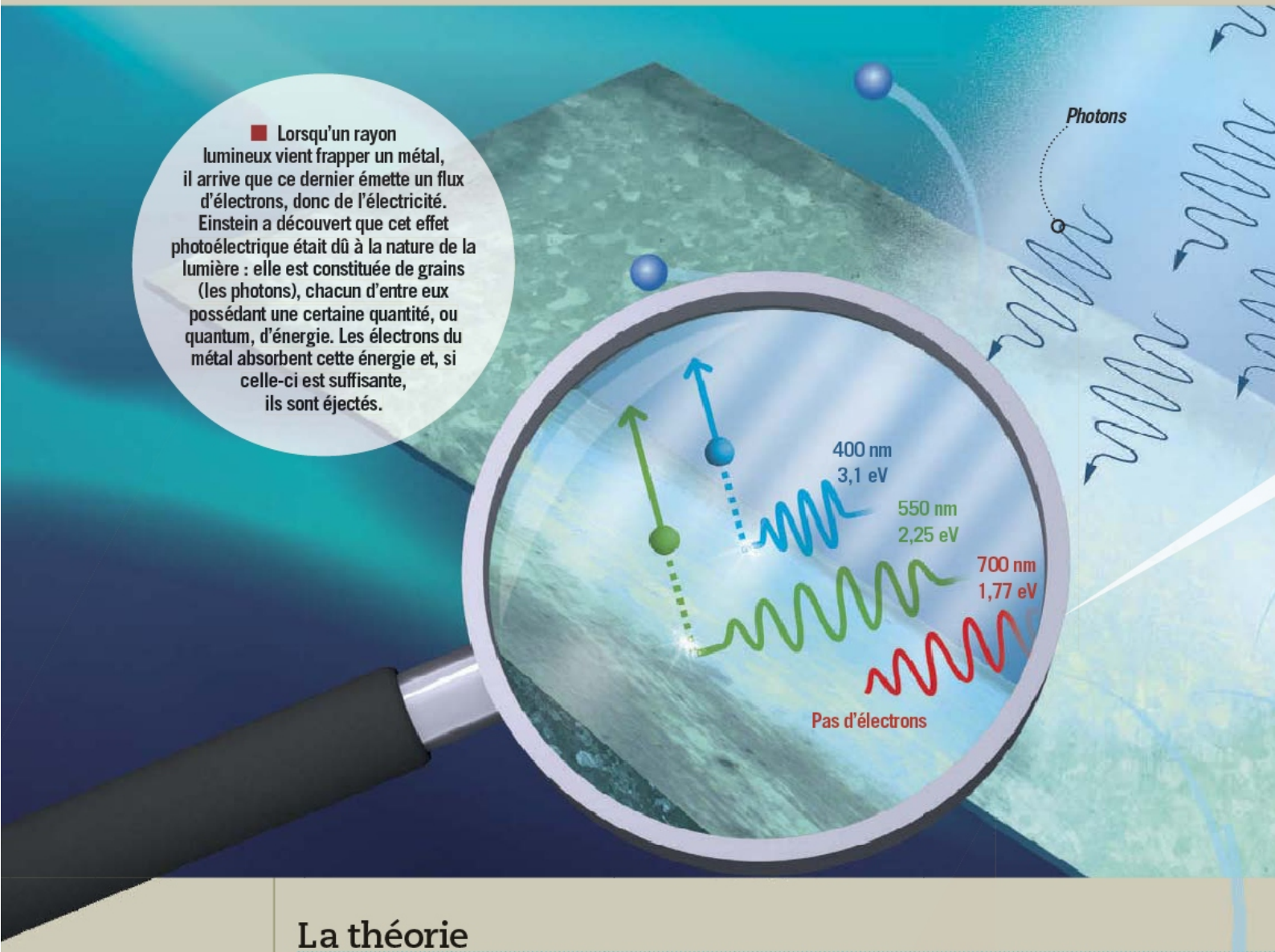
Certaines observations semblent toutefois échapper à cette théorie. Dès 1887, par exemple, Hertz constate qu'éclairé par un rayonnement ultraviolet, un morceau de métal génère de l'électricité. Or en 1900, Philipp Lenard (1862-1947), son ancien assistant, remarque que la surface irradiée n'émet plus d'électrons, et donc d'électricité, si la fréquence de la lumière (autrement dit sa couleur) est inférieure à une certaine valeur. Lenard a beau augmenter l'énergie globale des faisceaux, rien n'y fait. Selon la théorie ondulatoire, celle-ci est pourtant plus que suffisante pour arracher des électrons au métal ! Pourquoi cet « effet photoélectrique » ne semble-t-il dépendre que de la fréquence lumineuse ?

D'autres anomalies concernent le rayonnement du « corps noir », un matériau qui absorbe la quasi-totalité du spectre lumineux et semble donc sombre. Toutefois, à mesure que sa température augmente, ses constituants vibrent de plus en plus et émettent des rayonnements lumineux – rouges, jaunes puis blancs. Mais les fréquences mesurées ne correspondent pas aux prédictions de la théorie ondulatoire. En 1900, l'Allemand Max Planck (1858-1947) ne trouve d'autre façon de remédier au problème qu'en intégrant un « artifice de calcul » dans la formule mathématique décrivant le rayonnement du corps noir. Il consiste à subdiviser en petits paquets discontinus l'énergie des éléments de matière qui vibrent et émettent ce rayonnement. Les paquets d'énergie ont une valeur bien définie : ils dépendent de la fréquence et d'une constante qui portera le nom de Planck. Mais personne, et pas même ce dernier, n'en comprend alors la signification.

Étienne Klein, *Il était sept fois la révolution. Albert Einstein et les autres,* Flammarion, 2008

Olivier Darrigol, « 1905 : un nouvel élan », *in* Michèle. Leduc et Michel Le Bellac (éd.), *Einstein aujourd'hui*, CNRS Editions, 2005

Denis Brian, *Einstein. Le génie, l'homme,* Robert Laffont, 1997



■ Lorsqu'un rayon lumineux vient frapper un métal, il arrive que ce dernier émette un flux d'électrons, donc de l'électricité. Einstein a découvert que cet effet photoélectrique était dû à la nature de la lumière : elle est constituée de grains (les photons), chacun d'entre eux possédant une certaine quantité, ou quantum, d'énergie. Les électrons du métal absorbent cette énergie et, si celle-ci est suffisante, ils sont éjectés.

Les grains de lumière bombardent la surface métallique comme des obus, et non de manière uniforme comme le ferait une onde

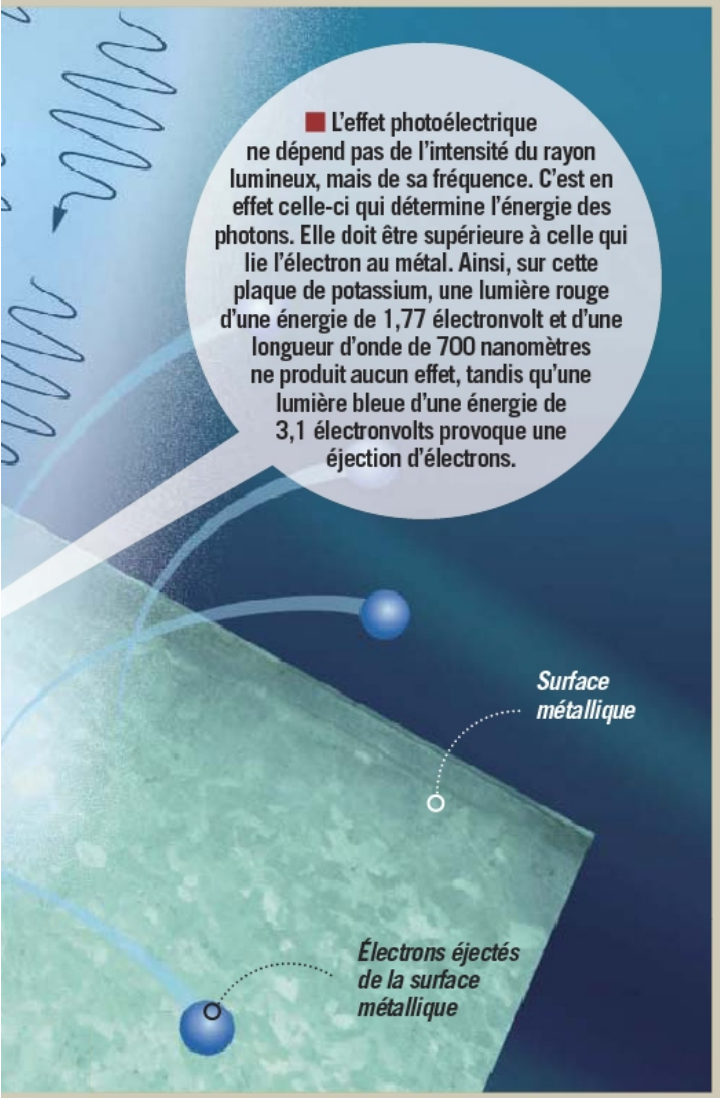
La théorie

Dès 1901, Einstein lit avec enthousiasme les travaux de Lenard et prend connaissance de la théorie de Planck. Avec le flair exceptionnel qui le caractérise pour identifier les brèches dans la physique contemporaine, il s'attaque, lui aussi, au rayonnement du corps noir, avec l'ambition de jeter un regard neuf sur la manière dont la matière absorbe et émet de la lumière.

Pour cela, il considère le cas d'une enceinte recouverte d'une paroi faisant office de corps noir. Einstein applique les principes de la thermodynamique pour calculer comment l'énergie du rayonnement est répartie dans une partie de l'enceinte, pour une température et une fréquence données. Il constate alors que cette énergie est distribuée de la même façon que dans un gaz composé d'atomes. Et Einstein de conclure que ce rayonnement se comporte *« comme s'il était constitué de quanta d'énergie indépendants les uns des autres »*.

Quanta. En 1905, Einstein utilise ce terme (« quantités », en latin) pour exprimer l'idée que la lumière peut se comporter comme un ensemble de grains d'énergie bien localisés dans l'espace. Et, selon ses calculs, l'énergie d'un quantum de lumière équivaut au produit de sa fréquence par… la constante de Planck ! *« Grâce à cette description quantique et corpusculaire de la lumière,* précise Olivier Darrigol, directeur de recherches au CNRS, *il explique facilement, à la fin de son article, les caractéristiques étranges de trois phénomènes : la fluorescence, l'effet photoélectrique, et l'ionisation des molécules par la lumière ultraviolette. La vulgate ne retiendra que le second. Sans doute parce que l'effet photoélectrique lui vaudra un prix Nobel [en 1921], mais aussi pour ses vertus pédagogiques sur les quanta d'énergie. »*

Qui rendent très bien compte, il est vrai, du fait que l'effet photoélectrique ne se manifeste qu'au-delà d'une certaine fréquence lumineuse. Les grains de lumière bombardent la surface métallique comme des obus, et non de



manière uniforme comme une onde le ferait. Certains cèdent leur énergie à des électrons quand ils les percutent. Si cette énergie est supérieure à celle qui lie les électrons au métal, les électrons sont éjectés. Dans le cas contraire, et quelle que soit la puissance du faisceau, aucun n'est arraché. Car ce n'est pas l'énergie globale du faisceau (c'est-à-dire le nombre de grains) qui importe, mais l'énergie de chacun des grains lumineux. Puisque celle-ci est proportionnelle à la fréquence, Einstein explique ainsi pourquoi l'effet photoélectrique ne se produit qu'avec la lumière bleue ou ultraviolette (les hautes fréquences), et non avec la lumière jaune ou rouge (les basses fréquences).

Et après…

De tous les travaux qu'Einstein publie en 1905, son « année miraculeuse », celui sur les quanta lumineux est le seul qu'il qualifie de *« vraiment révolutionnaire »*. À tel point que la quasi-totalité des physiciens ont alors raillé ses folles hypothèses ! Il faut dire qu'elles battent en brèche deux siècles de vérifications expérimentales sur la nature ondulatoire de la lumière. Einstein doutera lui-même, un temps, de la réalité physique des quanta lumineux. Et il faudra attendre les années 1920 pour que le Français Maurice de Broglie (1875-1960) et l'Américain Arthur Holly Compton (1892-1962) fournissent des preuves convaincantes de leur existence.

Einstein a vu juste. Mais comment concilier la nature corpusculaire de la lumière avec les observations précédentes ? *« Dès 1909,* répond Michel Paty, historien et philosophe des sciences à l'université Paris-Diderot, *Einstein émet l'idée que la lumière serait à la fois ondulatoire et corpusculaire ! Deux facettes d'une même réalité. Telle serait l'étrange nature des quanta de lumière »* – baptisés photons en 1926.

L'année suivante, Niels Bohr (1885-1962), de l'université de Copenhague, érige en principe ce dualisme pour le moins déroutant. Tout dépend, selon lui, de la manière dont la lumière est examinée : si l'on agence les appareils pour détecter un grain de lumière, il se dévoilera comme tel ; et si l'on cherche une onde, c'est sous cette forme qu'on l'observera !

S'appuyant sur les travaux d'autres physiciens qui ont suivi la voie ouverte par Einstein, il étend ce principe dit « de complémentarité » à tous les systèmes microscopiques dont le caractère quantique est peu à peu révélé, tels les atomes ou les électrons. C'est l'un des fondements de la mécanique quantique, construction théorique ô combien ardue qui décrit avec une précision inégalée le monde microscopique. Au prix, toutefois, d'un douloureux renoncement à une vision déterministe et objective de ses constituants. Car leur double nature empêche de connaître à la fois leur position et leur vitesse. On peut mesurer très précisément, soit l'une, soit l'autre, mais jamais les deux. Indétermination et probabilités règnent donc en maître dans l'infiniment petit.

DIEU NE JOUE PAS AUX DÉS !

Einstein, l'un des « pères » de la mécanique quantique, combattra pourtant avec force la lecture imposée par Niels Bohr, qui tient pour fondamental le caractère probabiliste des prédictions de cette théorie. Pour Einstein, au contraire, l'impossibilité de prédire les résultats des mesures autrement qu'en termes de probabilités est la preuve que la mécanique quantique néglige certains aspects de la réalité. Et qu'il existerait une théorie sous-jacente, plus complète. *« Une voix intérieure me dit qu'on n'a pas encore résolu le problème pour de bon. La théorie dit beaucoup de choses, mais elle ne nous rapproche pas d'un pouce des secrets du "Vieux" ["Dieu", dans l'acception d'Einstein]. Je suis, de toute façon, convaincu qu'Il ne joue pas aux dés. »* Toutes ses objections sur l'aspect « provisoire » de la mécanique quantique seront pourtant réfutées, et cette dernière ne sera jamais prise en défaut.

AGEFOTOSTOCK

Temps

RELATIVITÉ RESTREINTE

LES PARADOXES DE L'ESPACE-TEMPS

L'ESSENTIEL Les théories de Galilée et de Newton sont obsolètes à la vitesse de la lumière. Einstein démontre que cette dernière est une constante indépassable, et qu'à son approche, le temps semble se ralentir et l'espace se contracter. Une révolution conceptuelle dont découle la célèbre formule $E = mc^2$.

Avant Einstein

En 1630, pour illustrer son « principe de relativité », Galilée invite ses lecteurs à une expérience imaginaire : dans la cabine sans hublot d'un bateau amarré, il libère un papillon qui vole à une certaine vitesse, disons un mètre par seconde, vers l'avant de la cabine. Puis le navire quitte le quai, en suivant une trajectoire rectiligne et à vitesse constante – deux mètres par seconde, par exemple. Dans la cabine, tout se passe comme si le vaisseau était resté immobile. Le papillon se déplace à la même vitesse, dans la même direction. Sans repère extérieur, il est impossible de savoir si le navire est ou non à l'arrêt. Mais depuis le quai, le vol du papillon a été perçu autrement. Au bout d'une seconde, l'insecte a en effet parcouru un mètre vers l'avant du bateau, qui en a lui-même franchi deux. Le papillon s'est donc éloigné de trois mètres. Sa vitesse s'est ajoutée à celle du bateau.

Tout mouvement uniforme (en ligne droite et à vitesse constante) dépend du système de référence considéré, conclut Galilée.

En 1687, Isaac Newton adjoindra à la cinématique (science des mouvements) galiléenne l'action des forces (poussée, gravitation…) qui provoquent le mouvement des objets pour fonder sa « mécanique », et décrire ainsi le déplacement de tous les corps matériels. Ce monument de la science moderne repose sur deux postulats : l'existence d'un temps absolu, qui s'écoule de façon uniforme depuis l'infini du passé jusqu'à l'infini du futur, en dehors de toute conscience humaine. Et l'espace absolu, fixe, immuable et indépendant de tout contenu. Il définit en quelque sorte le « contenant » de la réalité. Un mètre vaudra donc partout un mètre ; et une seconde correspondra toujours à la même durée. Ce qui permet de définir la vitesse comme le rapport entre une distance et une durée absolues, et d'en additionner plusieurs.

Mais à quoi peut bien correspondre un espace vide de tout – sans sol ni repère pour l'appréhender ?

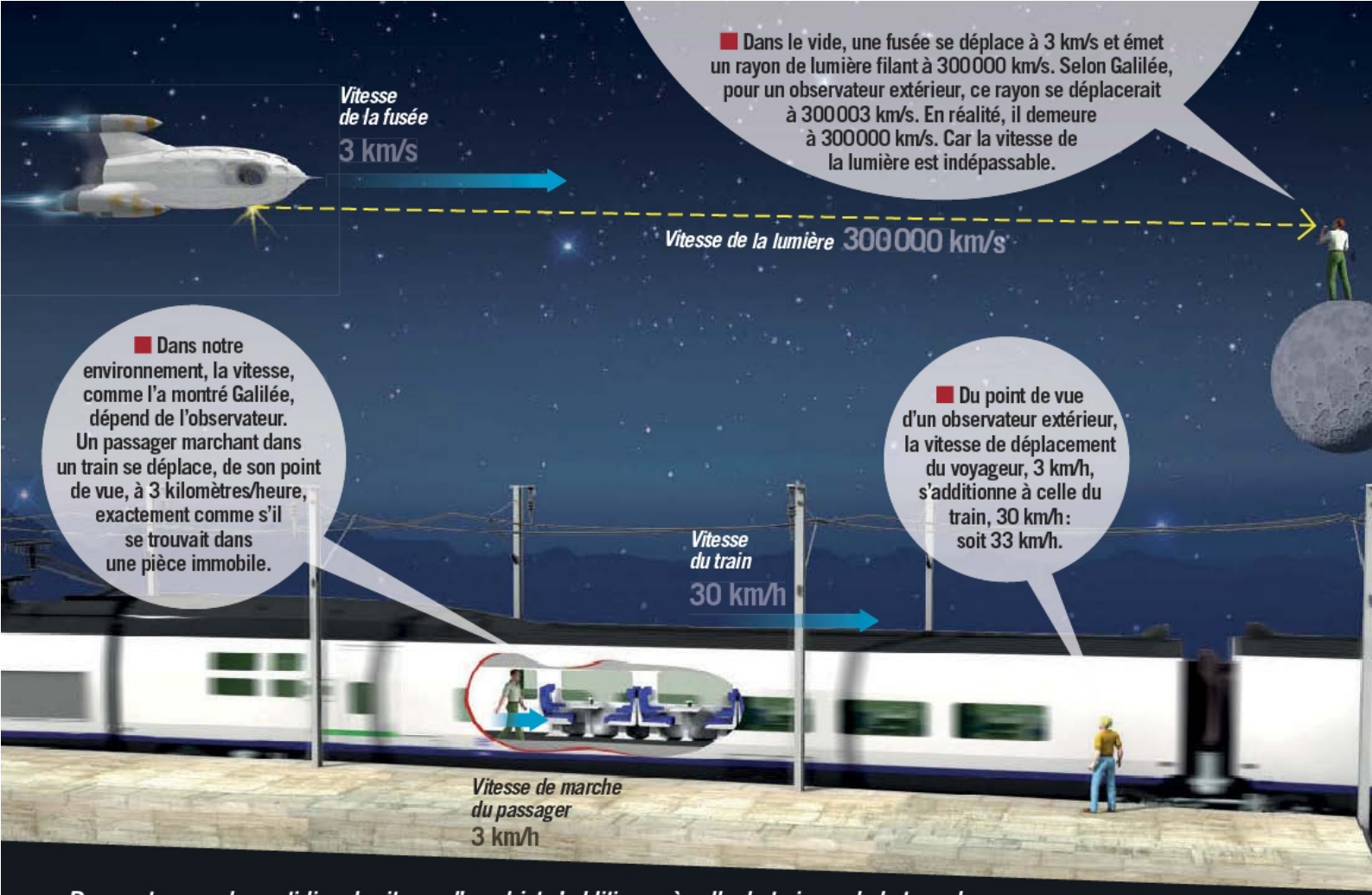
Au milieu du XIXe siècle, les physiciens sont persuadés d'avoir la réponse. La lumière est une onde électromagnétique, disent-ils *(lire pp. 39-41)*. Or une onde a besoin d'un milieu physique pour se propager, tel le son dans l'air. Celui qui véhicule la lumière est appelé « éther » : un fluide statique et impalpable, baignant tout l'Univers. Cet élément étrange matérialise l'espace absolu de Newton. Il représente une sorte de « quai universel » – le seul référentiel vraiment immobile à partir duquel tout mouvement peut être considéré.

Pour le mettre en évidence, on envisage de mesurer les effets du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière. Tout indique jusqu'alors que celle-ci

Françoise Balibar et Raffaella Toncelli, *Einstein, Newton, Poincaré : une histoire de principes,* Belin, 2008

Peter Galison, *L'Empire du temps. Les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré,* Folio essais, 2006

Vidéo-conférence d'Etienne Klein sur la théorie de la relativité restreinte : http://tinyurl.com/leazbsw



Dans notre monde quotidien, la vitesse d'un objet s'additionne à celle du train ou du bateau dans lequel il se déplace (en bas). Mais, à l'approche de la vitesse de la lumière, cette règle ne s'applique plus (en haut).

se propage dans l'espace (par rapport à l'éther, donc) à près de 300 000 kilomètres par seconde (km/s). On sait, par ailleurs, que notre planète se déplace, elle aussi dans l'espace, à 30 km/s. Les deux vitesses devraient donc s'ajouter (300 030 km/s) lorsqu'un rayon lumineux est émis dans le sens du mouvement de la Terre.

En 1887, les Américains Albert Michelson (1852-1931) et Edward Morley (1838-1923) construisent un dispositif assez précis pour mesurer les écarts attendus. Or ils n'en détectent aucun ! *« Pas question, de prime abord, de mettre en cause la loi d'addition des vitesses,* insiste Jean Eisenstaedt, historien à l'Observatoire de Paris. *C'est quelque chose d'impensable pour l'homme du XIXe siècle et les représentations qu'il se fait de la réalité physique. »* Que faut-il alors revoir dans les hypothèses de départ ? Où est l'erreur ?

La théorie

Certains physiciens attribuent alors à l'éther des propriétés encore plus mystérieuses, d'autres tentant de réviser les équations de l'électromagnétisme qui décrivent le comportement de la lumière. Les plus perspicaces, tels le Hollandais Hendrik Lorentz (1853-1928) et le Français Henri Poincaré (1854-1912), prennent au sérieux la possibilité que la lumière se propage toujours à la même vitesse. Ils modifient les équations de Galilée et émettent des hypothèses audacieuses sur la manière dont l'espace et le temps seraient affectés à des vitesses très élevées. Ils ne passent pas loin de la solution, mais le poids de la tradition et la brume de l'éther les aveuglent encore…

Leurs raisonnements manquent de cohérence et de simplicité, estime le jeune Einstein ! Il s'inspire néanmoins de leurs travaux et des réflexions de l'époque pour publier, en septembre 1905, un article de 31 pages qui résout toutes les contradictions. Einstein conserve les équations de l'électromagnétisme, mais reconsidère la cinématique galiléenne et les postulats de Newton.

Il fonde ainsi une nouvelle cinématique, qui sera nommée « théorie de la relativité restreinte ». Car elle ne s'applique qu'aux objets animés d'un mouvement rectiligne et uniforme et non à ceux dont le mouvement est accéléré ou décéléré, qui seront incorporés à la « relativité générale » *(lire pp. 46-49).*

Toute la relativité restreinte est fondée sur deux principes. Le premier stipule que les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels en mouvement uniforme. Il s'applique aux corps matériels, mais aussi à tous les phénomènes électromagnétiques telle la propagation de la lumière. Deuxième principe : la vitesse de la lumière dans le vide est ●●●

●●● constante, quel que soit le référentiel. N'importe quelle mesure donnera 300 000 km/s. En découle une série de conséquences qui défient le sens commun. Imaginons un voyageur, dans un train, qui croise un observateur immobile. À cet instant, il émet un rayon lumineux vers l'avant. Au bout d'une seconde, le rayon se trouvera donc à exactement 300 000 kilomètres des deux protagonistes. Or, ceux-ci ne devraient plus se trouver à la même distance puisque le train s'est déplacé entre-temps!

La seule explication possible, avance Einstein, c'est que les mesures de temps et d'espace sont faussées par le mouvement. Il établit une série de formules reliant les coordonnées d'espace et de temps d'un même événement selon qu'il est perçu dans un référentiel immobile ou en mouvement uniforme. Ces équations remplacent celles de Galilée en intégrant la vitesse – constante – de la lumière dans tous les calculs. Elles montrent que le temps d'un système qu'on voit bouger s'égrène moins vite que celui où l'on se trouve, immobile. Plus la vitesse est grande, plus le temps se « dilate ». La perception des distances est elle aussi modifiée: elles se « contractent » à mesure que la vitesse augmente. Les deux phénomènes sont indissociables. Un objet se déplaçant à 90 % de la vitesse de la lumière serait réduit de moitié aux yeux de l'observateur, et le temps où évolue cet objet s'écoulerait deux fois moins vite que celui de l'observateur!

Les notions d'espace et de temps sont donc « relatives », et n'ont de sens que pour un référentiel donné

Les notions d'espace et de temps sont donc « relatives », et n'ont de sens que pour un référentiel donné. Exit le temps unique de Newton, remplacé par une multitude de temporalités. L'espace absolu devient lui aussi caduc, tout comme le concept d'éther. La notion de simultanéité est également remise en cause: elle n'a de sens que dans un référentiel donné. Enfin, les équations de la relativité indiquent que la vitesse de la lumière est non seulement constante mais indépassable. Même si l'énergie cinétique d'un objet augmente indéfiniment, jamais sa vitesse ne pourra rattraper celle de la lumière.

Et après…

Les effets « relativistes », telles la dilatation du temps et la contraction des longueurs, ne se manifestent qu'à des vitesses proches de celle de la lumière. Aux vitesses plus basses, liées au monde sensible, les équations d'Einstein correspondent à celles de Newton. La relativité restreinte ne détrône donc pas la mécanique newtonienne. Mais elle la reformule en des termes plus généraux, valables jusqu'aux vitesses les plus élevées – en balayant les conceptions séculaires de l'espace et du temps.

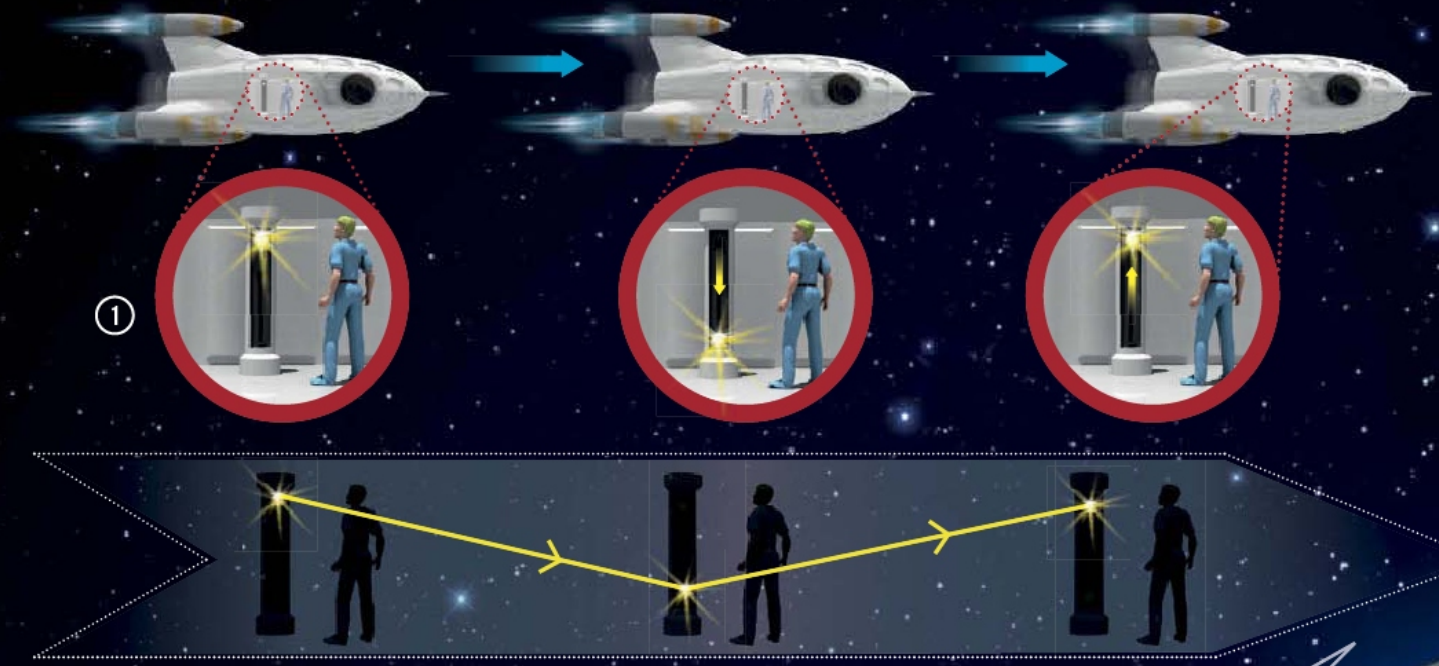
C'est donc avec anxiété qu'à l'automne 1905, Einstein guette les réactions de ses pairs. Il s'attend à rencontrer *« une opposition tranchante »*. Mais l'accueil est favorable! Dès 1906, le grand Max Planck (1858-1947) s'intéresse à ses travaux, et d'autres scientifiques souhaitent les approfondir. Le célèbre mathématicien Hermann Minkowski (1864-1909) notamment, un des anciens professeurs d'Einstein à Zurich qui l'avait traité de « fainéant »: *« L'espace, considéré séparément, et le temps, considéré séparément, sont destinés à disparaître comme des ombres, et seule une sorte d'union des deux gardera une réalité indépendante »*, écrit-il en 1907. Une combinaison baptisée « espace-temps ». Elle remplace le traditionnel espace newtonien à trois dimensions par un continuum dont chaque point est défini par quatre nombres – longueur, largeur, hauteur et temps. *« Minkowski met ainsi sur pied une formulation quadridimensionnelle de la relativité restreinte qui aura une grande influence sur l'évolution et l'acceptation de la théorie »*, précise Jean Eisenstaedt.

La relativité restreinte ne détrône pas la mécanique newtonienne, mais elle la reformule en des termes plus généraux

Entre 1905 et 1907, Einstein découvre lui-même une autre implication remarquable, la plus importante à ses yeux, de sa théorie. *« Il m'est tout à coup venu à l'esprit que le principe de relativité associé aux équations de l'électromagnétisme implique que la masse d'un corps est une mesure directe de l'énergie qu'il renferme »*, écrit-il à un de ses amis. Voici jetés les fondements de l'équation la plus célèbre de la physique: $E = mc^2$! L'énergie d'un corps est égale au produit de sa masse par le carré de la vitesse de la lumière. En d'autres termes, matière et énergie sont équivalentes. La matière se transforme en énergie quand elle approche la vitesse de la lumière, et l'énergie devient matière quand elle perd de la vitesse. Cette formule suppose que la masse est de l'énergie « figée », et prédit qu'une infime quantité de matière peut relâcher une énergie colossale: preuve en est donnée par les phénomènes de radioactivité.

L'élasticité de l'espace-temps

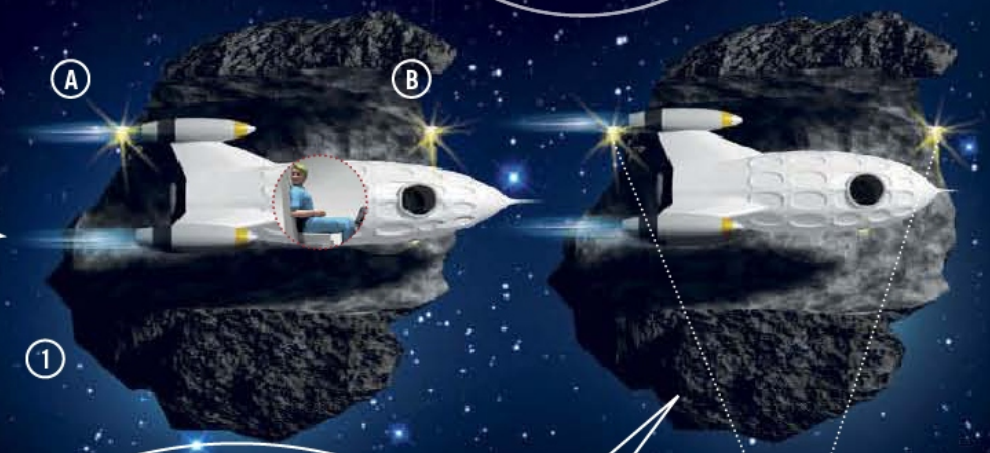
À l'approche de la vitesse de la lumière, l'espace et le temps ne sont plus absolus. Leur perception dépend de la position de l'observateur, à l'intérieur de la fusée ❶, ou à l'extérieur ❷.



Le temps est dilaté par la vitesse

■ Dans une fusée se déplaçant à la vitesse de la lumière, une horloge lumineuse scande le temps. Pour le commandant de bord, un battement représente une unité de temps. Mais l'observateur extérieur perçoit le signal lumineux selon un trajet allongé par le déplacement du vaisseau. De ce fait, le battement dure plus longtemps, le temps lui apparaît ralenti.

■ La fusée traverse un « tunnel » dans une météorite. Un signal lumineux est émis à l'entrée du tunnel quand la queue du vaisseau vient d'y pénétrer (A), un autre à l'avant quand le nez s'apprête à en sortir (B). Le commandant, assis au milieu du vaisseau, perçoit d'abord la lumière devant lui, ce qu'il traduit comme: le nez de la fusée sort du tunnel, puis le signal derrière lui, qui lui signifie: la queue de la fusée est entrée dans le tunnel. Il en déduit que le vaisseau est plus long que le tunnel.



L'espace est contracté par la vitesse

■ Un observateur extérieur, placé à égale distance des deux signaux, perçoit les signaux à l'avant et à l'arrière du tunnel au moment où le vaisseau est à l'intérieur. Pour lui, pas de doute, vaisseau et tunnel ont la même longueur. L'espace apparaît donc contracté par la vitesse.

RELATIVITÉ GENERALE

LES CHEMINS SINUEUX DE LA GRAVITATION

L'ESSENTIEL Par une extraordinaire expérience de pensée, Einstein découvre la véritable nature de la gravitation, et l'inscrit dans la relativité générale. Selon cette théorie, la géométrie de l'Univers est façonnée par la présence de corps massifs déterminant les trajectoires de tous les objets du cosmos.

NASA

Avant Einstein

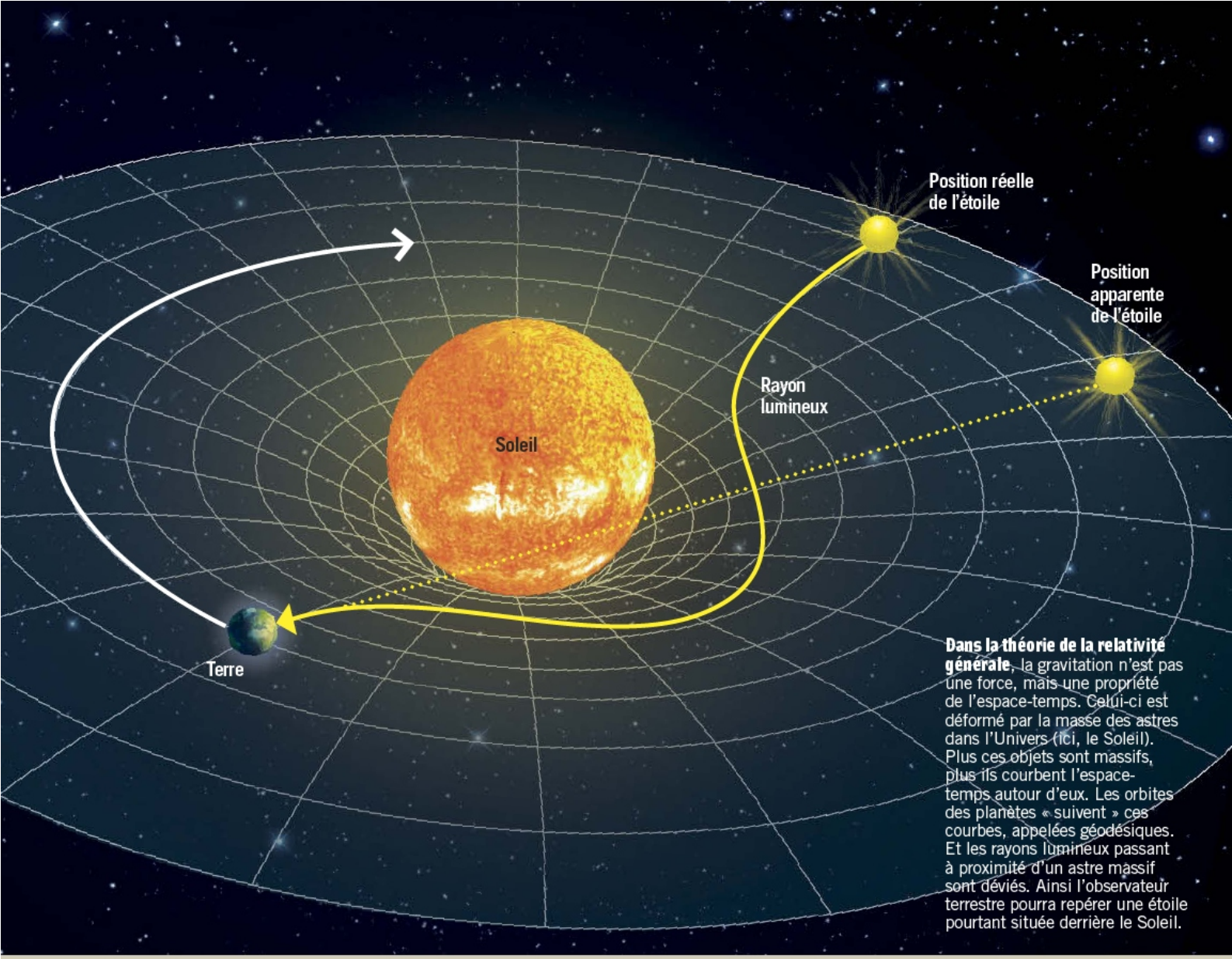
La théorie de la relativité restreinte, formulée en 1905, sort Einstein de l'anonymat. Ses conclusions audacieuses sur la manière dont le mouvement modifie les notions d'espace et de temps suscitent l'intérêt de scientifiques de renom. À l'automne 1907, le physicien allemand Johannes Stark (1874-1957) lui demande de rédiger un article de synthèse pour une revue scientifique allemande. Constance de la vitesse de la lumière, abandon des concepts d'espace et de temps absolus, équivalence entre la masse et l'énergie ($E=mc^2$)… Les principaux aspects de la théorie sont passés en revue. À la fin de l'article, Einstein envisage pour la première fois de l'appliquer à la gravitation. Son nouveau défi, qui conduira à son plus beau chef-d'œuvre.

Tout ce que l'on sait, à l'époque, sur cette force, a été établi plus de deux cents ans auparavant par Isaac Newton (1643-1727). Son idée maîtresse : tous les corps s'attirent les uns les autres. C'est la même attraction « universelle » qui entraîne la chute d'une pomme ou maintient la Lune en orbite. Elle explique avec une précision d'horloger presque tout ce que l'on observe dans le ciel. Et cela à partir d'une simple formule : *« Deux corps quelconques s'attirent selon une force proportionnelle au produit de leur masse, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. »*
Même si peu de confrères l'y encouragent, Einstein estime avoir de bonnes raisons de chercher une loi plus fondamentale. Avant tout, il se refuse à admettre que la physique puisse être fondée sur deux « cinématiques », deux sciences du mouvement. D'un côté, la relativité restreinte, qui décrit les phénomènes électromagnétiques telle la propagation de la lumière ; de l'autre, la cinématique newtonienne qui régit encore la gravitation. Mais Einstein veut également étendre sa théorie à tous les phénomènes physiques et à tous les types de mouvements, non seulement ceux qui se produisent à vitesse constante, comme dans la relativité restreinte, mais aussi les mouvements accélérés. Or la théorie de Newton est incompatible avec la relativité restreinte. La force gravitationnelle ne s'y propage-t-elle pas à une vitesse infinie? Impossible pour Einstein, qui vient de montrer que toute vitesse a une limite indépassable, celle de la lumière.

Lee Smolin, *La Renaissance du temps. Pour en finir avec la crise de la physique*, Dunod, 2014

Thibault Damour, *Si Einstein m'était conté. De la relativité à la théorie des cordes*, Cherche-Midi, 2012

Jean Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale. Les chemins de l'espace-temps*, CNRS Éditions, 2002



Dans la théorie de la relativité générale, la gravitation n'est pas une force, mais une propriété de l'espace-temps. Celui-ci est déformé par la masse des astres dans l'Univers (ici, le Soleil). Plus ces objets sont massifs, plus ils courbent l'espace-temps autour d'eux. Les orbites des planètes « suivent » ces courbes, appelées géodésiques. Et les rayons lumineux passant à proximité d'un astre massif sont déviés. Ainsi l'observateur terrestre pourra repérer une étoile pourtant située derrière le Soleil.

La théorie

Une « expérience de pensée » met Einstein sur la voie. En 1907, alors qu'il prépare son article de synthèse sur la relativité, il réalise qu'*« un homme tombant en chute libre du haut d'un toit »* ne sent plus son poids, comme si les effets de la gravitation étaient annulés ; et que tous les objets qu'il lâcherait tomberaient autour de lui dans un même « repos » apparent. Rien de bien nouveau à cela, puisque le phénomène de chute libre a été identifié dès le XVIe siècle par Galilée. Celui-ci a constaté que tous les objets tombaient avec la même accélération, leur vitesse croissant de la même façon si la résistance de l'air était négligeable. Lâchés dans le vide, une plume et un marteau toucheront donc le sol en même temps ! Mais ni Galilée, ni Newton, n'ont expliqué ce phénomène.

Einstein, en revanche, y voit un indice révélant la « vraie » nature de la gravitation. Si tous les objets soumis à un même champ gravitationnel tombent avec la même accélération, c'est que champ gravitationnel et champ d'accélération traduisent un seul et même phénomène. Pour l'illustrer, il imagine un ascenseur dérivant dans l'espace, loin de toute source gravitationnelle. Dedans, une personne flotte en apesanteur… Mais dès que l'ascenseur sera tiré, accéléré vers le haut, elle sera plaquée au plancher et sentira son « poids », comme si elle subissait l'attraction terrestre. Dans un ascenseur sans fenêtre, on ne pourra jamais savoir si l'on est soumis à un champ gravitationnel ou d'accélération *(voir l'infographie p. 49)*. Ils sont équivalents, conclut Einstein, qui tient là *« l'idée la plus heureuse de [sa] vie ! »*

Ce « principe d'équivalence » lui permet de comprendre que la gravitation envisagée comme une force n'est qu'un leurre. *« Si tous les corps tombent avec la même accélération, quelle que soit leur masse, c'est que leurs trajectoires ne dépendent que du champ gravitationnel et non de la manière dont ils réagissent à ce champ, réalise Einstein. Il en déduit que les trajectoires sont indépendantes des objets eux-mêmes, gravées dans l'espace comme le sont les rivières sur la Terre »*, explique Jean Eisenstaedt, historien à l'Observatoire de Paris. C'est la répartition de la masse (et de l'énergie, selon la formule $E = mc^2$) dans l'Univers qui façonnerait ●●●

●●● sa structure, sa géométrie. Les « chemins de l'espace-temps », autrement dit. La gravitation ne serait donc pas une force d'attraction agissant à travers l'espace, mais une propriété de l'espace lui-même ! Un corps massif, tel que la Terre, ne crée pas des interactions gravitationnelles, mais fait converger vers son centre les trajectoires de chute libre.

« Je n'ai jamais travaillé avec autant d'acharnement de toute ma vie, et j'ai acquis un grand respect pour les mathématiques »

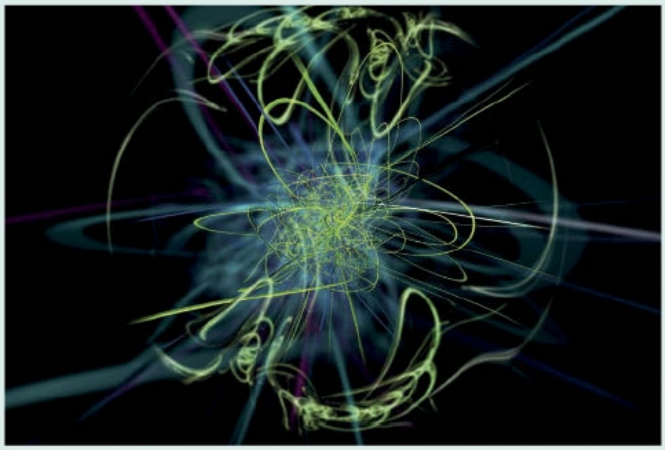
Albert Einstein, 1912

Dès la fin de l'année 1907, Einstein imagine trois façons de mettre à l'épreuve son incroyable hypothèse. La première consisterait à observer la déviation d'un rayon lumineux près d'un corps massif, le Soleil par exemple, *via* les trajectoires imposées par son champ gravitationnel. La deuxième concerne l'influence du champ gravitationnel sur la longueur d'onde d'un rayonnement émis par un atome : elle devrait être plus grande près du Soleil que sur la Terre, en raison de la différence de champ gravitationnel aux abords de ceux-ci. Enfin, Einstein espère que sa théorie résoudra une « anomalie » dans l'orbite de Mercure *(lire pp. 55-59)* que la formule de Newton est incapable d'expliquer. Trois tests qui, plus tard, seront réalisés avec succès.

Son programme est tracé. Il peut traiter la gravitation tel un champ d'accélération, et doit à présent comprendre comment celui-ci « géométrise » l'espace-temps. Mais il ne progresse pas pendant quatre ans. En juin 1912, il inscrit ses recherches dans un cadre nouveau : la géométrie des espaces courbes, inventée par l'Allemand Bernhard Riemann (1826-1866). Il est désormais convaincu que c'est la courbure de l'espace-temps qui exprime les champs gravitationnels. Plus un corps est massif, plus il déforme celui-ci. La matière dit à l'espace-temps comment il doit s'incurver, et l'espace-temps dit à la matière comment elle doit se déplacer, résumera le physicien John Wheeler (1911-2008). Dans pareille structure, les chemins les plus courts et donc les plus rapides ne sont plus des lignes droites, comme dans l'espace-temps plat de la relativité restreinte, mais des courbes : les « géodésiques ».

L'INSAISISSABLE « THÉORIE DU TOUT »

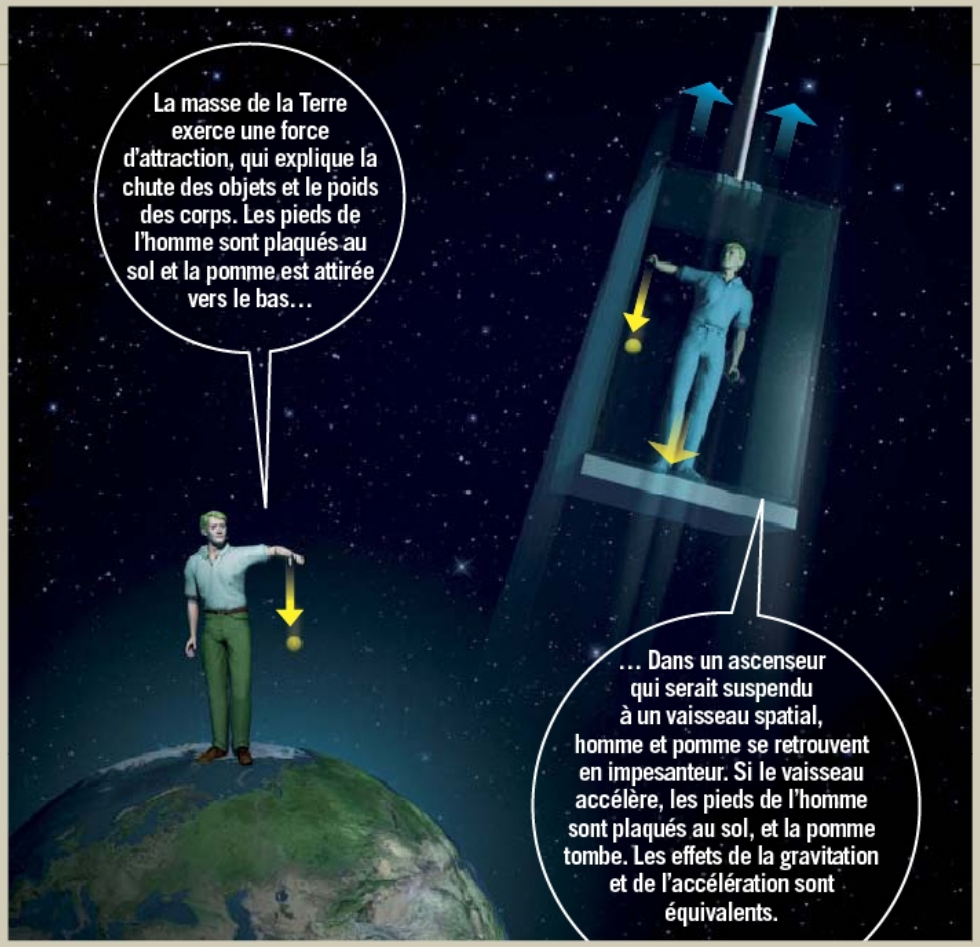
Toute l'œuvre d'Einstein est traversée par le désir d'unifier des phénomènes disparates, de dévoiler des symétries, de construire des théories encore plus fondamentales. Car une idée le hante : la nature est « harmonieuse » et se révèle à la conscience humaine à travers la beauté, l'unité et la rationalité mathématique de l'Univers. La relativité restreinte et la relativité générale ne sont que des étapes dans cette recherche de cohérence et de simplification. Dès le début des années 1920, alors que la grande affaire des physiciens est désormais la mécanique quantique, Einstein se lance, lui, à la poursuite d'une théorie regroupant les deux interactions fondamentales connues alors : la gravitation et l'électromagnétisme (deux autres seront découvertes par la suite, les forces nucléaires « faible » et « forte », responsables respectivement de la radioactivité et de la cohésion des noyaux atomiques). Einstein n'est pas le premier à viser cet objectif : les Allemands Hermann Weyl (1885-1955) et Theodor Kaluza (1885-1954) s'y sont essayés peu de temps avant lui. Inspiré par leurs travaux, il publie en 1922 un court article sur le sujet. Le premier pas d'une quête à laquelle il ne renoncera jamais. Pour unifier les équations de l'électromagnétisme (qui regroupait lui-même, depuis le milieu du XIXe siècle, l'électricité et le magnétisme) et de la relativité générale (sa théorie de la gravitation), Einstein teste plusieurs idées. Elles consistent à jouer sur la géométrie de l'espace-temps ou à intégrer une hypothétique dimension supplémentaire, imperceptible à nos sens mais où la force unifiée qu'il traque se manifesterait. Aucune ne marche. Elles trahissent, toujours, l'un ou l'autre des principes qu'il tient pour essentiels. Gravitation et électromagnétisme résistent à toutes ses tentatives d'unification. *« Disons que c'est une boîte fermée dans laquelle je ne sais pas ce qu'il y a »*, déplore-t-il en 1931. Cette année-là, le physicien Wolfgang Pauli (1900-1958) balaie d'un bon mot son obstination : *« L'Homme ne rassemblera jamais ce que la main de Dieu a dispersé. »* Mais Einstein reste persuadé du bien-fondé de ses recherches. Il les poursuivra jusqu'à son lit de mort, à Princeton, en avril 1955. Aujourd'hui, même s'il a pris une forme différente, le graal d'Einstein est plus que jamais d'actualité. Les théoriciens s'efforcent d'unifier les forces fondamentales dans une « théorie du Tout », comme celle des cordes, expliquant l'ensemble des phénomènes physiques, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.



SPL/COSMOS

À la recherche d'une explication globale des forces existant dans la nature, des physiciens ont imaginé la théorie des cordes (vue d'artiste).

Pour le comprendre, imaginons l'espace-temps comme une feuille de caoutchouc tendue. Une pierre posée dessus provoque une déformation d'autant plus importante qu'elle est lourde. Si une balle roule à proximité, elle sera déviée ; et si elle passe trop près, elle entrera en « orbite ». Ainsi des corps matériels et des rayonnements électromagnétiques : ils ne feraient que suivre les courbures générées par la répartition des corps massifs dans l'Univers. *« Je n'ai jamais travaillé avec autant d'acharnement de toute ma vie,* écrit Einstein en octobre 1912 *[...]. La théorie originelle de la relativité est un jeu d'enfant comparé à ce problème ! »* Trois ans de travail lui seront encore nécessaires pour finaliser, le 25 novembre 1915, les équations de la « relativité générale » qui, à sa grande joie, expliqueront parfaitement l'orbite de Mercure !



Et après…

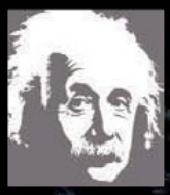
« Nouvelle théorie de l'Univers : les idées de Newton renversées », annonce le *Times* de Londres le 7 novembre 1919. La veille s'est tenue à la Royal Society une réunion exceptionnelle. En vedette : deux expéditions scientifiques de retour du Brésil et du golfe de Guinée, où elles étaient partis observer une éclipse totale de Soleil afin de confirmer les prédictions d'Einstein sur la courbure des rayons lumineux. Et les preuves sont là : Einstein avait raison !
Il connaît soudainement une gloire qui durera jusqu'à la fin de sa vie. La relativité générale devient un symbole d'intelligence et de sagesse transcendantale que seuls quelques esprits peuvent comprendre – ce qui, dans les premières années tout du moins, n'est pas loin de la réalité.
La théorie trouve vite son champ d'application naturel : l'infiniment grand, l'Univers. Et c'est Einstein, encore, qui donne l'élan. Dès 1917, il propose le premier modèle cosmologique entièrement mathématisé. Ses équations pointent un Univers en expansion, où les étoiles s'éloignent les unes des autres. Pourtant, il n'y croit pas. Il est persuadé que l'Univers est statique, sans début, ni fin. Pour retrouver un Univers globalement immuable, il ajoute un terme, baptisé « constante cosmologique », à ses équations. Mais une dizaine d'années plus tard, l'astronome Edwin Hubble (1889-1953) prouve que l'Univers est bel et bien en expansion – découverte qui permettra à la théorie du Big Bang de s'imposer.

Au niveau scientifique, la théorie trouve vite son champ d'application naturel : l'infiniment grand, l'Univers

« Si le début des années 1920 sourit à la relativité générale, souligne Jean Eisenstaedt, *celle-ci connaît ensuite sa traversée du désert. Les physiciens ne l'étudient plus, ne l'utilisent pas. »* Du fait de son extraordinaire complexité technique, tout d'abord. Ensuite, parce que la théorie newtonienne suffit encore à expliquer la quasi-totalité des données disponibles. Enfin, la relativité générale n'est longtemps corroborée que par deux tests : l'orbite de Mercure et la déviation des rayons lumineux. Même Einstein n'y travaille plus, préférant se consacrer à son nouveau graal, l'unification des forces *(lire l'encadré ci-contre)*.
Mais la « renaissance » n'est pas loin. En 1960, sa théorie est confirmée pour la première fois par une expérience terrestre : les Américains Robert Pound et Glen Rebka vérifient que la longueur d'onde des rayonnements des atomes est modifiée par le champ gravitationnel de la Terre. Cette même année, la solution fondamentale aux équations de la relativité générale, qui décrit le champ gravitationnel de tout corps sphérique, est éclairée d'un jour nouveau par le mathématicien Joseph Kruskal (1928-2010). Développés par le Britannique Roger Penrose et d'autres théoriciens, ces travaux permettront de mettre en évidence l'existence des « trous noirs ». À partir des années 1970, la théorie d'Einstein s'impose comme un outil indispensable pour décrire l'Univers et les objets qu'il contient.

Des planètes extrasolaires surprises par la lumière

PAR HERVÉ PONCHELET



En **1936**, Einstein calcule que la lumière d'une étoile lointaine, courbée par le champ de gravitation d'un astre plus proche qui l'éclipse, peut être détectée depuis la Terre. Depuis **2005**, plusieurs planètes extrasolaires ont été repérées grâce à ce phénomène.

La méthode des lentilles gravitationnelles permet "d'attraper" des planètes lointaines non géantes. Ainsi d'OGLE-2005-BLG-390Lb, dont l'étoile est une naine brune repérée en 2005 : elle n'est que cinq fois plus massive que notre planète (vue d'artiste).

ESO

Avril 1936. Rudi Mandl, ingénieur tchèque immigré aux États-Unis, rend visite à Einstein pour lui demander s'il est possible que, comme le suggère sa théorie de la relativité générale, la lumière d'une étoile lointaine, courbée par le champ de gravitation d'une étoile plus proche, soit amplifiée et détectable depuis la Terre lorsque les trois astres sont alignés. Le physicien réalise, selon ses propres termes, un *« petit calcul »* qu'il envoie à *Science* pour publication. Conclusion du papier, titré « Action de pseudo-lentille par la déviation de la lumière dans le champ gravitationnel » : l'effet existe, mais *« il n'y a pas beaucoup de chance d'observer ce phénomène »*. Dans ses remerciements à la rédaction, le grand savant glisse, condescendant : *« Permettez-moi de vous remercier de votre coopération à cette petite publication que M. Mandl m'a extorquée. Ce n'est pas grand-chose, mais cela fera plaisir à ce pauvre gars »* !

Aujourd'hui, le *« pauvre gars »* peut dormir de l'éternel sommeil du juste. Non seulement les astronomes savent capter l'infinitésimal et transitoire – eh oui, les astres bougent ! – effet de microlentille créé par l'étoile écran : amplification de la lumière et dédoublement de l'image… Mais aussi l'incidence, encore plus faible, de la présence d'une éventuelle planète tournant autour d'elle. Des observations qui ont donné naissance à la technique dite des lentilles gravitationnelles, désormais utilisée en routine par une nouvelle génération d'astrophysiciens à la recherche de planètes extrasolaires.

Une « manip » infiniment plus délicate à mettre en œuvre et interpréter que la première confirmation, par Arthur Eddington, de la prédiction de la relativité générale selon laquelle la lumière devait courber l'échine sous le joug de la gravitation. Pour en avoir le cœur net, l'astrophysicien britannique était allé photographier en Afrique l'éclipse de Soleil du 21 août 1919. Sur ses clichés étaient apparues, effectivement, des étoiles alors situées derrière le disque incandescent. La masse imposante du Soleil courbait bien la lumière issue des astres. CQFD.

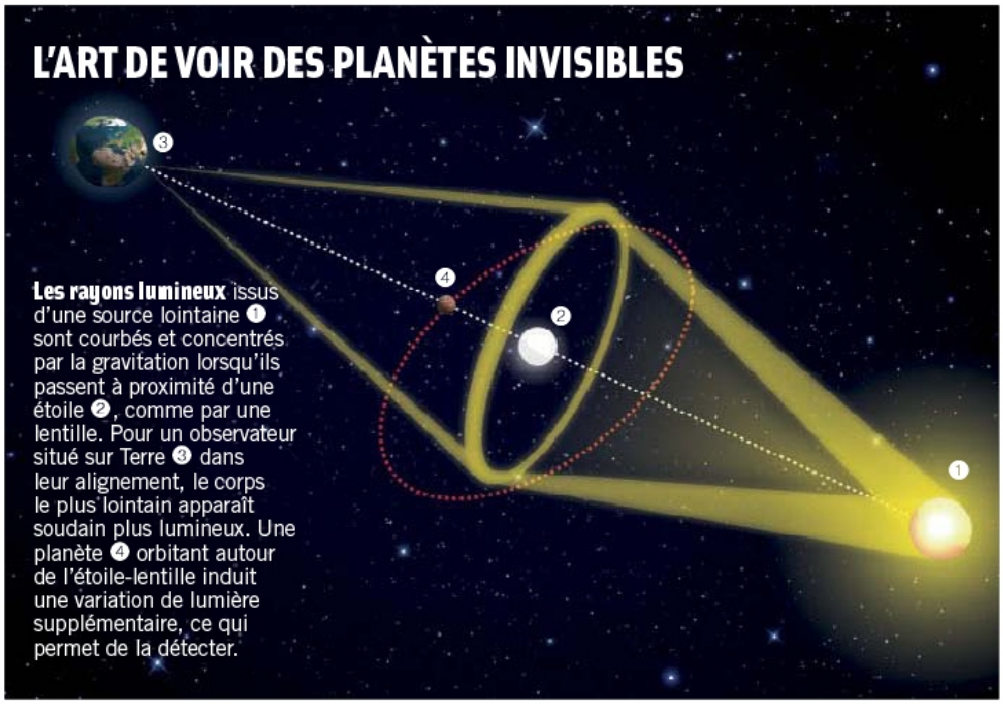
Une opération plus difficile aussi à réaliser que la capture des puissants « mirages gravitationnels » observés depuis 1979. Il s'agit d'images de galaxies lointaines éclipsées par des galaxies plus proches constituant, avec leurs milliards de masses solaires, des macrolentilles. Des images déformées sous forme d'arcs plus ou moins complexes, comme lorsqu'un pochard regarde le soleil au travers d'un cul de bouteille ! ●●●

●●● La recherche de planètes extrasolaires est une aventure scientifique comme on les aime ! S'y illustrent une poignée d'astronomes français fédérés par Jean-Philippe Beaulieu, de l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP). Un Bordelais de 45 ans, issu d'une famille de médecins. Un chercheur qui, en parallèle à l'astrophysique, nourrit une passion pour les arts du Pacifique, et en particulier de la Papouasie-Nouvelle-Guinée dont une gerbe de sculptures trône au centre de son bureau, niché au fond du parc de l'Observatoire. Pour pouvoir discuter avec les artistes de Nouvelle-Irlande de leurs statues funéraires, sur lesquelles il prépare un livre, il a même appris le pidgin local, un créole à base d'anglais.

Le règne de la nuit éternelle

Jean-Philippe Beaulieu se souvient : *« Lors d'un séminaire à Berkeley en 1989, Charles Alcock, directeur du Smithsonian Astrophysical Observatory* (Cambridge, Massachusetts), *proposa de monter une expérience : il s'agissait de chercher, par effet de lentilles gravitationnelles, la matière noire (1) du halo de notre galaxie. On l'imaginait alors sous forme de naines brunes – ou superplanètes flottantes. Un post-doctorant de l'auditoire, Jim Rich, séduit par l'idée, contacta aussitôt Michel Spiro, physicien des particules au CEA de Saclay. Enthousiaste, ce dernier se rendit dans la salle de cours voisine de l'École polytechnique, où enseignait Alfred Vidal-Madjar, de l'IAP, pour lui demander son avis… C'est ainsi qu'a vu le jour Eros (Expérience pour la recherche d'objets sombres), dont j'ai fait partie. »* Mais, six ans plus tard, la matière noire n'était toujours pas au rendez-vous des lentilles gravitationnelles.

L'ART DE VOIR DES PLANÈTES INVISIBLES



Les rayons lumineux issus d'une source lointaine ❶ sont courbés et concentrés par la gravitation lorsqu'ils passent à proximité d'une étoile ❷, comme par une lentille. Pour un observateur situé sur Terre ❸ dans leur alignement, le corps le plus lointain apparaît soudain plus lumineux. Une planète ❹ orbitant autour de l'étoile-lentille induit une variation de lumière supplémentaire, ce qui permet de la détecter.

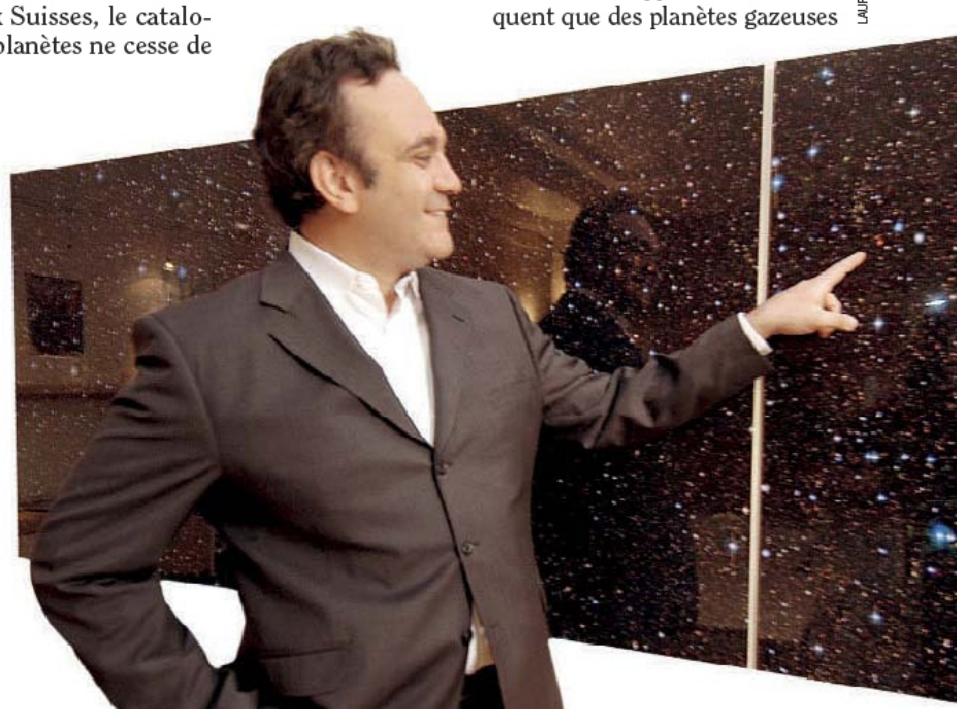
MEHDI BENYEZZAR

À la même époque, les astrophysiciens suisses Michel Mayor et Didier Queloz étudient l'étoile 51 Pegasus située à cinquante années-lumière de la Terre. Ils montrent que ses légers mouvements d'oscillation ne peuvent s'expliquer que par la perturbation induite par une masse tournant autour d'elle. En l'occurrence, calculent-ils, une planète de la taille de Jupiter. Nous sommes en 1995, ils viennent d'identifier pour la première fois une planète extrasolaire. Depuis, grâce à la méthode des « vitesses radiales » utilisée par les deux Suisses, le catalogue des exoplanètes ne cesse de se remplir.

■ TOUT SAVOIR SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
dans les Repères pp. 46 à 49

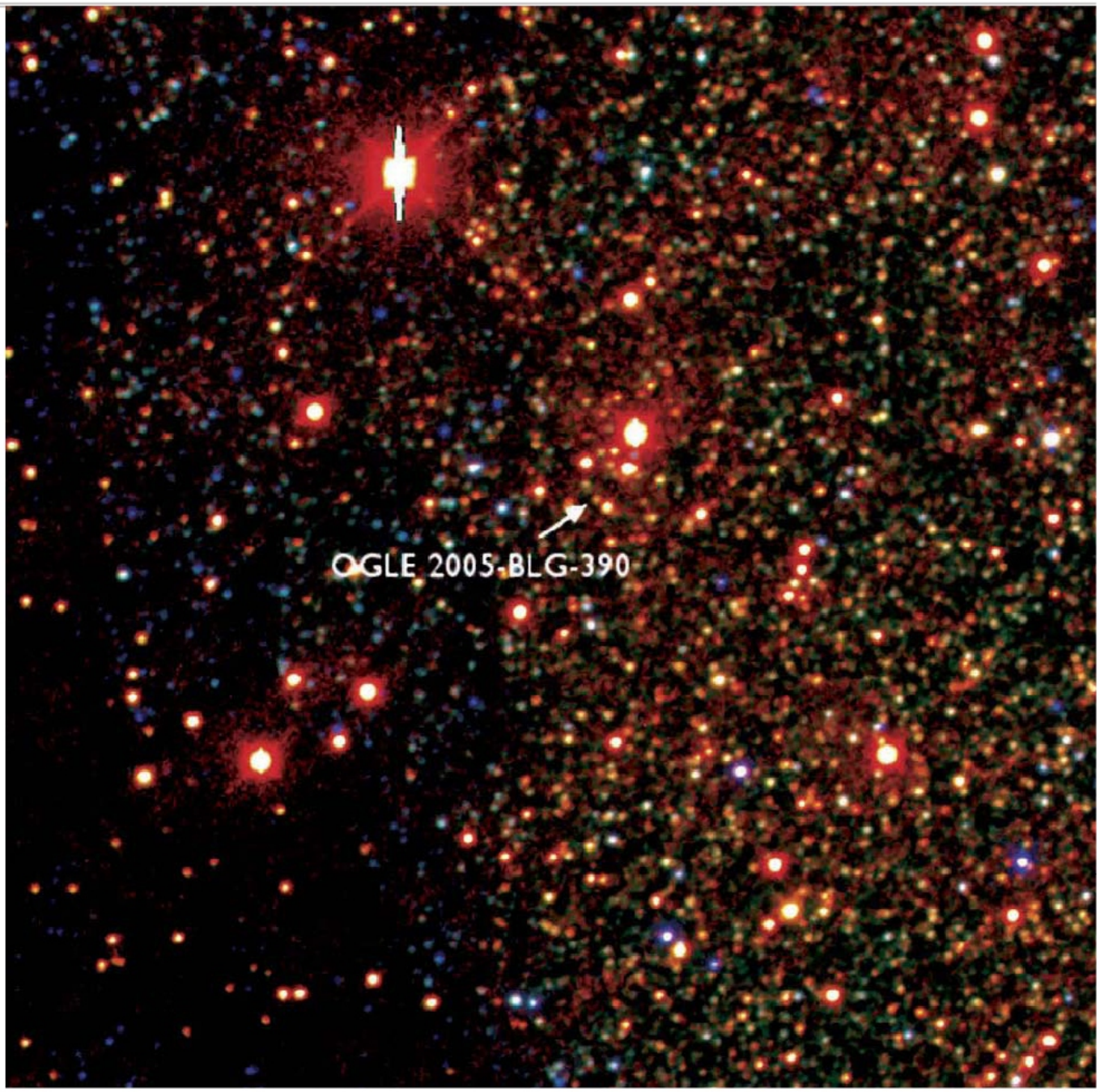
D'autres astrophysiciens, eux, privilégient la méthode dite des transits. Quand une planète passe devant son étoile, la luminosité de celle-ci diminue en effet légèrement, trahissant la présence de la première. En utilisant cette technique, mais avec une sensibilité cent fois meilleure que celle des télescopes terrestres, les satellites Corot, européen (2006-2012), et Kepler, de la Nasa (lancé en 2009), ont multiplié les découvertes. En 2013, Kepler comptait 134 planètes extrasolaires à son tableau de chasse !
Mais ces deux approches ne débusquent que des planètes gazeuses

LAURENT SAZY/DIVERGENCE



« Nous pensions découvrir des planètes pas plus grosses que la nôtre et dont l'eau serait liquide »

Jean-Philippe Beaulieu, Institut d'Astrophysique de Paris



CNRS/INSU/IAP/JEAN-PHILIPPE BEAULIEU

plus ou moins géantes, orbitant très près de leur étoile, ou des planètes rocheuses dont la masse avoisine celle de la Terre mais qui, frôlant leur soleil, sont des enfers. Bref, des monstres par comparaison avec le petit peuple bien ordonné de notre Système solaire. Pour prouver que ce n'est là qu'un biais dû aux limites des méthodes d'observation dominantes, les promoteurs des lentilles gravitationnelles s'organisent. *« Cette technique devait nous permettre de découvrir des planètes pas plus grosses que la nôtre,* raconte Jean-Philippe Beaulieu, *et situées à une distance telle de leur étoile que l'eau y serait liquide »*, ce que l'on nomme la « limite des glaces ».

L'année même de la découverte de 51 Pegasus, *« un pas décisif est franchi. Sous l'impulsion de Bohdan Paczynski, de l'université de Princeton, il est décidé que les détections de lentilles seraient rendues publiques. Paczynski va même jusqu'à faire signer cet engagement par écrit à ses confrères : une révolution éthique dans ce monde de la recherche où la compétition fait rage! »*. Le réseau mondial des télescopes issu de cet accord, qui en se relayant instaurent le règne de la nuit éternelle, rêve inavoué de tout astronome, s'appelle désormais Planet (Probing Lensing Anomalies Network).

Située à 22 000 années-lumière de la Terre, OGLE-2005-BLG-390Lb première exoplanète tellurique, c'est-à-dire composée de roches et de métaux, orbite autour d'une étoile naine. Ce type de système doit être commun dans notre galaxie.

À l'époque, Jean-Philippe Beaulieu est en post-doctorat aux Pays-Bas. Son travail consiste – excusez du peu ! – à développer les programmes informatiques nécessaires au traitement automatique des images de milliers d'étoiles surveillées en continu par des caméras équipées de capteurs. De véritables rétines électroniques, développées à l'origine pour feu la guerre des étoiles du belliqueux président Reagan ! Ces programmes, que Jean-Philippe Beaulieu a baptisés Quyllurwasi, « la maison des étoiles » ●●●

●●● en quechua, langue parlée dans les Andes où sont érigés nombre de télescopes géants, sont eux-mêmes dérivés de la *big science* (2), celle des gros instruments. Il s'agissait à l'origine d'une méthode de tri automatique à haut débit permettant de « pêcher » un minuscule et fugitif événement dans une multitude de gerbes de particules crachées par un grand accélérateur, comme celui du Cern à Genève. Désormais, ils pêchent dans un océan d'étoiles « la » lentille tant désirée. Phénomène qui révélera, peut-être, la présence d'une planète extrasolaire.

B. TAFRESHI/ESO

Pour observer une exoplanète par lentilles gravitationnelles, il ne faut pas la quitter des yeux. Tout autour du monde, des télescopes se relaient pour créer une « nuit éternelle » et la suivre à chaque instant. Ici l'observatoire européen de La Silla, au Chili.

En 2005, bingo !

En 2002, les neuf télescopes du réseau Planet, lequel rassemble trente personnes de dix pays différents, sont pourvus de ces programmes *made by* Beaulieu. Las ! Les aléas climatiques liés à el Niño, qui gênent les observations dans l'hémisphère Sud, les incompatibilités d'humeur, qui conduisent à l'éclatement d'équipes associées au projet, les inévitables tâtonnements font que les résultats espérés tardent…

Mais en 2005 : bingo ! *« Cette année-là, en collaboration avec le Polonais Andrzej Udalski, nous participons enfin à la détection d'une planète extrasolaire »*, se réjouit Jean-Philippe Beaulieu. La belle, qui accuse 3,5 fois la masse de Jupiter, a pour nom de code OGLE 2005-BLG-071Lb. Située à 11 000 années-lumière d'ici, elle tourne autour d'une étoile moitié moins massive que notre Soleil, à une distance comprise entre 2,1 et 3,5 fois la distance Terre-Soleil (distance prise comme unité astronomique, ou UA). Dans la foulée, c'est au tour d'OGLE 2005-BLG-390Lb – 5,5 fois la masse terrestre – d'être capturée à 22 000 années-lumière. Elle orbite à 2,6 UA autour d'une étoile de 0,2 masse solaire, et sa température de surface est de -220°. D'où son surnom de Hoth, comme la planète glacée de *Star Wars*.

Et bientôt, ce n'est plus une planète solitaire orbitant autour de son étoile, mais des systèmes de deux planètes qui sont caractérisés par les coopérateurs de Planet. Ceux-ci peuvent aussi compter sur les observations de trente télescopes amateurs organisés en consortium mondial. De petits instruments qui n'ont rien à envier à ceux des professionnels… et coûtent tout de même entre 20 000 et 30 000 euros ! C'est ainsi qu'une Néo-Zélandaise, Jennie Mc Cormick, a participé à la découverte de OGLE 2005-BLG-071Lb, première conquête de la bande à Beaulieu. Son commentaire laconique : *« Cela montre simplement que l'on peut être mère, travailler à plein temps… et, en plus, trouver des planètes ! »*

Alfred Vidal-Madjar, *Il pleut des planètes*, Hachette Littératures

Encyclopédie des planètes extrasolaires : http://exoplanet.eu/

Aujourd'hui, il « pleut », toutes techniques de détection confondues, une vingtaine de planètes extrasolaires par an. Une moisson méticuleusement archivée à l'Observatoire de Paris par Jean Schneider dans son encyclopédie des planètes extrasolaires, un bestiaire qui compte à ce jour 1800 individus. Mieux ! En 2012, Arnaud Cassan de l'IAP, a publié dans *Nature* un article, cosigné par Jean-Philippe Beaulieu, son ancien directeur de thèse. Il y proposait une méthode statistique qui lui permet de démontrer que dans notre Voie lactée le nombre de planètes est d'au moins une par étoile, soit au total plusieurs centaines de milliards ! L'amateur d'art du Pacifique et grand chasseur de planètes extrasolaires, qui chaque année *« passe six semaines à observer sur la montagne »* (entendez dans un observatoire), jubile. ■

Dans notre Voie lactée, le nombre de planètes est d'au moins une par étoile, soit au total plusieurs centaines de milliards

1. Matière manquante de l'Univers, possiblement formée d'objets massifs.

2. Projets à grande échelle développés par des gouvernements ou des groupes internationaux.

En **1915**, la relativité générale permettait de résoudre enfin l'énigme de l'orbite de Mercure. Lancée en **2015**, la mission Bepicolombo pourrait repousser les limites de la théorie d'Einstein.

Les révélations de **Mercure**, planète excentrique

PAR VINCENT REA

Plus petite planète du Système solaire, Mercure est aussi la plus proche de notre étoile : la distance entre les deux astres varie de 46 à 70 millions de kilomètres, selon la position de Mercure sur son orbite elliptique.

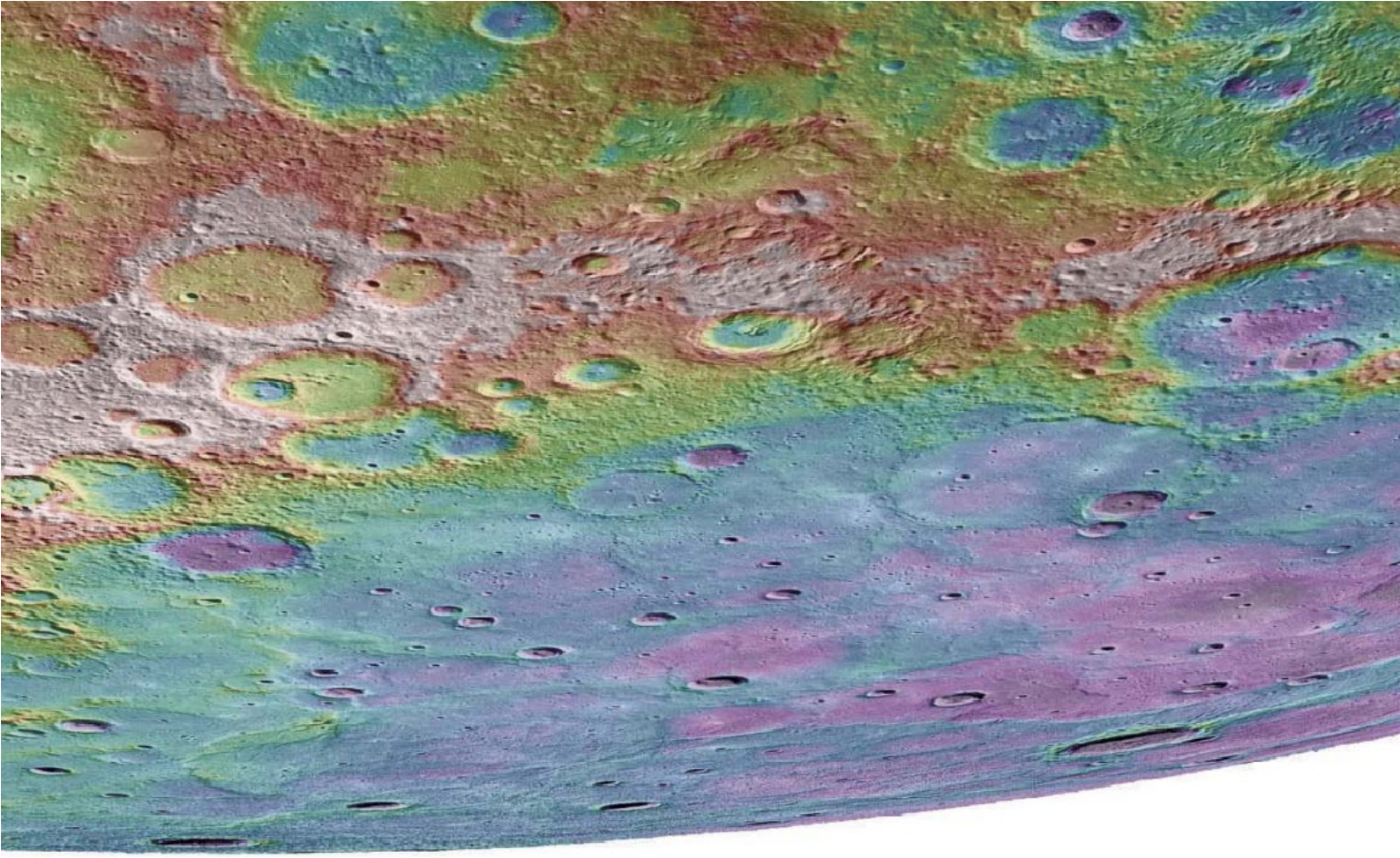
SPACETELESCOPE.ORG

Elle n'est pas du genre à se laisser approcher facilement. Et pour cause… Située à 80 millions de kilomètres de la Terre, et si proche du Soleil qu'elle est le plus souvent masquée par son éclat, Mercure est longtemps restée dans les limbes de l'astronomie. Il fallut attendre l'année 1974 pour que les photographies prises par la sonde américaine Mariner 10 *(lire « En savoir plus » p. 57)* permettent de lever une part de son mystère. Mieux! Depuis 2008, la mission Messenger et son impressionnante batterie d'instruments ont permis d'en affiner le portrait: reliefs peu élevés, cratères géants, dépôts de glace, ainsi qu'un énorme noyau métallique liquide…

À l'observatoire de Nice, les astrophysiciens de l'unité de recherche GéoAzur, avec le soutien du Cnes et de l'université de Franche-Comté, et en collaboration avec l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), ont épluché cette moisson de données, désormais disponibles sur la base du Planetary Data System *(lire « En* ●●●

Jean Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale*, CNRS Éditions, 2013

Albert Einstein, *La Relativité*, Payot, 2005



NASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY/APL

●●● *savoir plus » p. 57).* Premier résultat, de taille : la détermination de l'éphéméride de Mercure la plus précise jamais réalisée. Un outil extraordinaire pour confronter la théorie avec les observations. Agnès Fienga, membre de l'équipe, n'en revient toujours pas : *« Les mesures effectuées nous permettent d'estimer la position de la planète avec une précision de 10 mètres ! Avant Messenger, c'était un kilomètre. Le fait de disposer d'une sonde en orbite autour d'un objet céleste engendre des avancées remarquables dans bien des domaines ! »* Il faut dire que la plus petite planète du Système solaire a longtemps posé des problèmes aux astronomes. Longtemps… jusqu'à ce qu'Einstein s'en mêle.

Sous la coupole de l'Observatoire de Paris, l'astrophysicien Michel Toulmonde actionne la machine à remonter le temps. *« Les Grecs connaissaient Mercure. Mais au IIe siècle de notre ère, Ptolémée a dû trouver des astuces, des combinaisons de plusieurs cercles pour faire coller l'orbite très excentrique de la planète avec sa théorie des mouvements circulaires. »* Les « tables » du savant d'Alexandrie constitueront néanmoins la référence des astronomes pendant près de 1500 ans.

■ TOUT SAVOIR SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
dans les Repères pp. 46 à 49

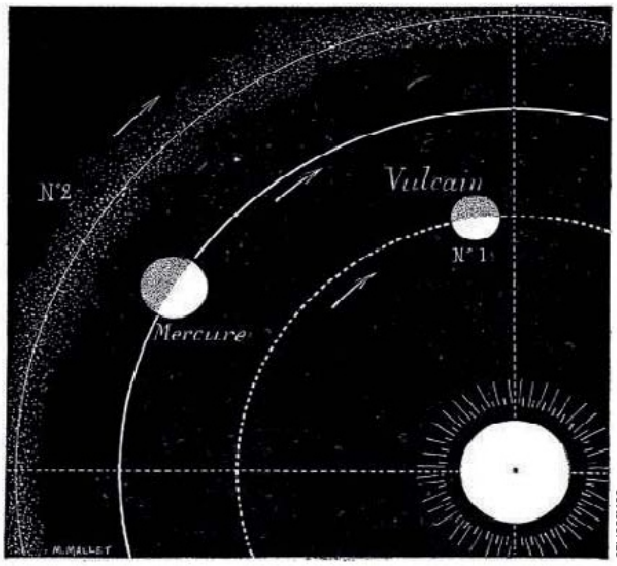
Perturbée par ses voisines

C'est à partir du XVIe siècle que les observations s'accélèrent. L'œil affûté de Tycho Brahe (1546-1601) repère un grand nombre de positions de Mars, de Jupiter et, plus difficilement, de Mercure. S'appuyant sur ses travaux, son assistant Kepler, mathématicien brillant, établit en 1627 les précieuses – et précises ! – Tables rodolphines, ainsi appelées en l'honneur de l'empereur du Saint-Empire romain-germanique Rodolphe II*.

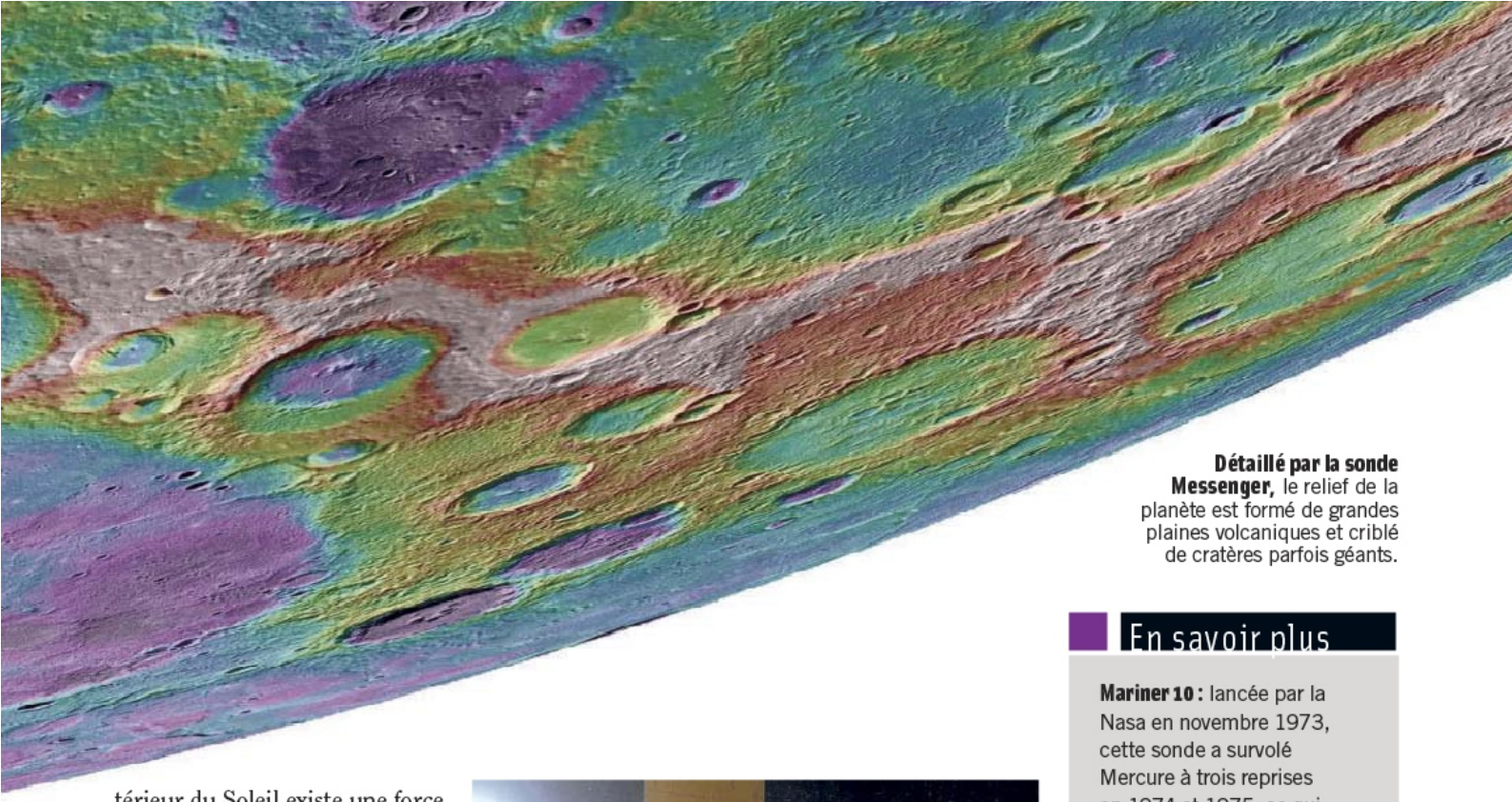
Il prévoit même un passage de Mercure devant le disque solaire pour le 7 novembre 1631… ce qu'observera effectivement son confrère français Pierre Gassendi. Kepler constate que les planètes ne décrivent pas des cercles, mais des ellipses, et imagine qu'à l'in-

SPL/COSMOS

En 1846, l'astronome Urbain Le Verrier découvre Neptune par une série de calculs. Sur sa lancée, il se penche sur les problèmes que pose l'orbite de Mercure et « débusque » une autre planète : Vulcain… qui, elle, n'existe pas !



SPL/COSMOS

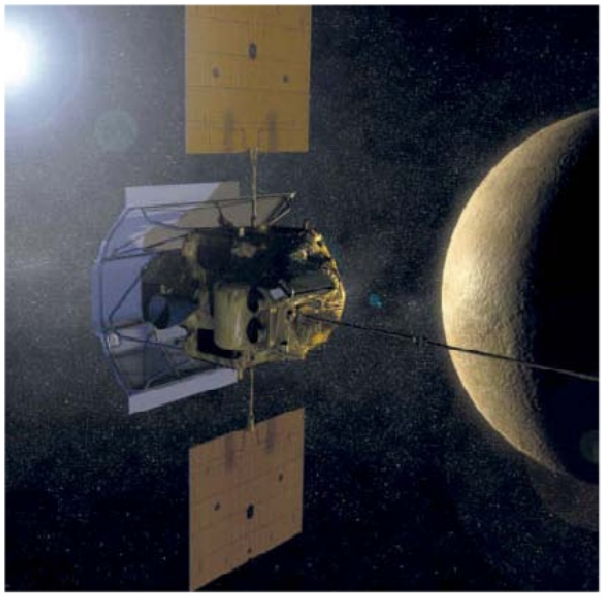


Détaillé par la sonde Messenger, le relief de la planète est formé de grandes plaines volcaniques et criblé de cratères parfois géants.

térieur du Soleil existe une force magnétique qui serait la cause de leurs mouvements. Moins d'un siècle plus tard, en 1687, Newton démontre par le calcul que les orbites sont effectivement elliptiques, et décrit les effets de la force mystérieuse qui s'exerce entre deux masses (la gravitation universelle), mais sans en donner la nature.

En revanche, il est le premier à prévoir que dans un système à plus de deux corps, l'ellipse décrite par une planète, perturbée par ses voisines, puisse ne pas être fermée. Le point de l'orbite le plus proche du Soleil, le périhélie, se décale alors légèrement à chaque rotation *(voir l'infographie p. 58)* : c'est ce qu'on appelle la précession, qui avait déjà été observée pour Mars et Vénus. Les calculs newtoniens sont en accord avec les mouvements observés à l'époque. Tout semble donc aller pour le mieux dans la mécanique céleste. Sauf que…

Sauf que les techniques d'observation se perfectionnent (la lunette astronomique est utilisée systématiquement dès 1609) et que les outils de l'analyse mathématique, alors en pleine expansion (logarithmes, calcul infinitésimal, etc.), permettent d'affiner les modèles. D'abord pour le plus grand bonheur des astronomes. En 1781, William Herschel découvre ainsi Uranus. Puis, quelques décennies plus tard, cherchant à comprendre pourquoi le mouvement de celle-ci n'est pas conforme au modèle de Newton, Urbain Le Verrier, à l'Observatoire de Paris, se lance dans une série d'équations, brasse des valeurs de masses et de distances… et découvre Neptune (1846). *« Au bout de sa plume »*, dira François Arago, alors directeur de l'établissement, puisque ce sont ses calculs qui lui ont permis de localiser la planète.



NASA/MESSENGER

Les données récoltées par Messenger ont permis aux astrophysiciens d'élaborer la meilleure éphéméride jamais produite de la planète. Ils l'ont utilisée pour éprouver la relativité générale.

Vilain canard cosmique

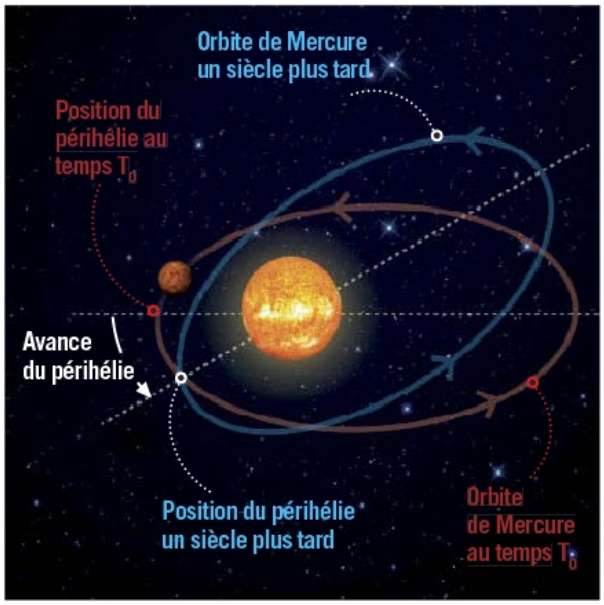
Sur sa lancée, Le Verrier tente d'expliquer pourquoi Mercure « ne tourne pas rond » – une des grandes questions de l'astronomie de l'époque. Il choisit comme point de repère le périhélie de son orbite et constate qu'en un siècle, le décalage observé est de ●●●

En savoir plus

Mariner 10 : lancée par la Nasa en novembre 1973, cette sonde a survolé Mercure à trois reprises en 1974 et 1975, ce qui a permis de découvrir son champ magnétique, d'obtenir les premières photos détaillées (environ 3500 clichés), et de cartographier 45% de sa surface.

Messenger : embarquant quatre spectromètres, deux caméras, un altimètre laser et un magnétomètre, la sonde lancée par la Nasa en 2004 est en orbite depuis 2011. Après épuisement de son carburant, elle devrait s'écraser sur Mercure le 28 mars prochain. Elle a déjà permis d'effectuer une cartographie complète de la planète, et d'en savoir plus sur la composition de sa surface et de son exosphère, les caractéristiques de son noyau, ainsi que l'origine de son champ magnétique.

Planetary Data System : cette base de données gérée par la Nasa regroupe les informations brutes (spectrométriques, radiométriques, etc.) générées par les missions d'observation du Système solaire, ainsi que la documentation associée. Ces archives sont accessibles aux chercheurs, qui peuvent les traiter et les enrichir.



MEHDI BENYEZZAR

●●● 570 secondes de degré. Or, même en incluant dans ses calculs les données issues des perturbations gravitationnelles des autres planètes, surtout Vénus et Jupiter, il reste un écart incompressible de 38 secondes par siècle par rapport aux prévisions newtoniennes. L'éminent astronome en conclut que cet écart ne peut être dû qu'à l'influence d'une planète qui évolue entre Mercure et le Soleil. Ce sera… Vulcain.

Une hypothèse d'autant plus probable que des taches rondes ont été observées sur le disque solaire. Tout à son enthousiasme, Le Verrier prédit un passage de Vulcain devant le Soleil pour 1877… *« On l'attend encore !* s'amuse Michel Toulmonde. *Dépités, certains confrères attribuent à la masse des poussières présentes dans le plan du Système solaire un effet de gravitation sur Mercure. Sans plus de succès. »*

On était tombé sur un os. Et la réputation de Mercure comme vilain petit canard cosmique allait être renforcée en 1882 par l'Américain Simon Newcomb qui, sur la base d'un plus grand nombre d'observations historiques, estimerait l'écart séculaire à 43 secondes !

Les effets gravitationnels exercés par le Soleil et les planètes environnantes perturbent le mouvement de Mercure. Conséquence : l'axe de son ellipse pivote. Elle se décale (passant ici d'une manière exagérée de la trajectoire rouge à la trajectoire bleue), et son périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) avance à chaque révolution (0,16° par siècle).

Une énigme résolue à 99 %

Et puis arrive Einstein. En 1915, sa théorie de la relativité générale *(lire pp. 46-49)* démontre que la gravitation induit une déformation de l'espace-temps, liée à la masse des corps célestes. Une planète en orbite autour du Soleil suit donc une géodésique – une courbe – de cet espace-temps : une orbite, circulaire ou non. Logiquement, pense Einstein, cet effet gravitationnel doit être maximal au plus près du Soleil. Il envisage immédiatement de tester sa théorie avec le mouvement de Mercure. Par le biais de la mécanique relativiste et de ses équations extrêmement compliquées, il obtient un résultat très proche des 43 secondes de Newcomb. *« Dès 1913, Einstein avait trouvé 18 secondes, mais il avait incorrectement formulé ses calculs*, précise Michel Toulmonde. *En novembre 1915, il tient enfin la première vérification expérimentale de sa théorie, avant même que celle-ci ne soit formulée complètement. Extraordinaire ! »*

La géodésique de l'espace-temps qu'emprunte Mercure est donc une orbite non fermée, qui pivote à chaque tour d'un angle de l'ordre de 0,1 seconde. Voilà l'anomalie de Mercure résolue par la relativité générale. La solution à cette énigme qui semblait insurmontable contribue naturellement au succès de la théorie. *« L'avancée du périhélie est une conséquence directe des effets relativistes*, résume Agnès Fienga depuis son bureau niçois. *Elle est expliquée à 99 % par Einstein. »*

Fin de l'histoire ? Ce serait mal connaître les physiciens, pour qui la relativité générale, même très satisfaisante et *« élégante dans ses équations »*, n'est pas ultime. Des hypothèses alternatives ont vu le jour. Et nombreux sont ceux qui poursuivent un nouveau graal : la théorie qui unifierait toutes les forces et toutes les particules connue. Mécanique quantique – qui explique l'infiniment petit – et relativité générale – qui s'applique à l'infiniment grand –, aujourd'hui toujours incompatibles. Dans cette quête effrénée, les physiciens cherchent à détecter de petites « violations » de la relativité générale, visant à la prendre en défaut. Ils espèrent ainsi recueillir les premiers indices expérimentaux de cette « théorie du Tout ». Et Mercure occupe toujours une place de choix dans leurs recherches.

SPLCOSMOS

Selon la théorie des cordes, les briques élémentaires de la matière seraient des cordes vibrantes (vue d'artiste). Les données sur Mercure recueillies par la mission Bepicolombo permettront de tester ce type de théorie alternative à la relativité générale.

AGNÈS FIENGA

« Les mesures effectuées nous permettent d'estimer la position de Mercure avec une précision de 10 mètres ! »

Agnès Fienga, astrophysicienne à l'observatoire de la Côte-d'Azur

« *Ceci, parce que dans tout le Système solaire, c'est sur l'orbite de cette planète que l'effet de la relativité générale est le plus fort*, reprend l'astrophysicienne. *Or, la précision d'une éphéméride permet d'estimer plus exactement ce qui relève de cet effet dans le mouvement de Mercure.* » C'est pourquoi les observations radio récol-

Dans cette quête effrénée, les physiciens cherchent à détecter de petites violations de la relativité générale

tées par la sonde, qui permettent de suivre son orbite à dix mètres près, sont pain bénit.
Concrètement, à Nice, on s'intéresse aux « violations » de la gravité en faisant évoluer certaines variables dans les équations, et en confrontant le résultat aux localisations hyper-précises de la planète obtenues grâce à Messenger. Dans la théorie d'Einstein, l'avancée du périhélie de Mercure est paramétrée notamment par l'élément bêta: Einstein postule, comme Newton avant lui, que la force gravitationnelle diminue de manière linéaire à mesure que l'on s'éloigne de sa « source », ce que l'on note « bêta égale 1 ».

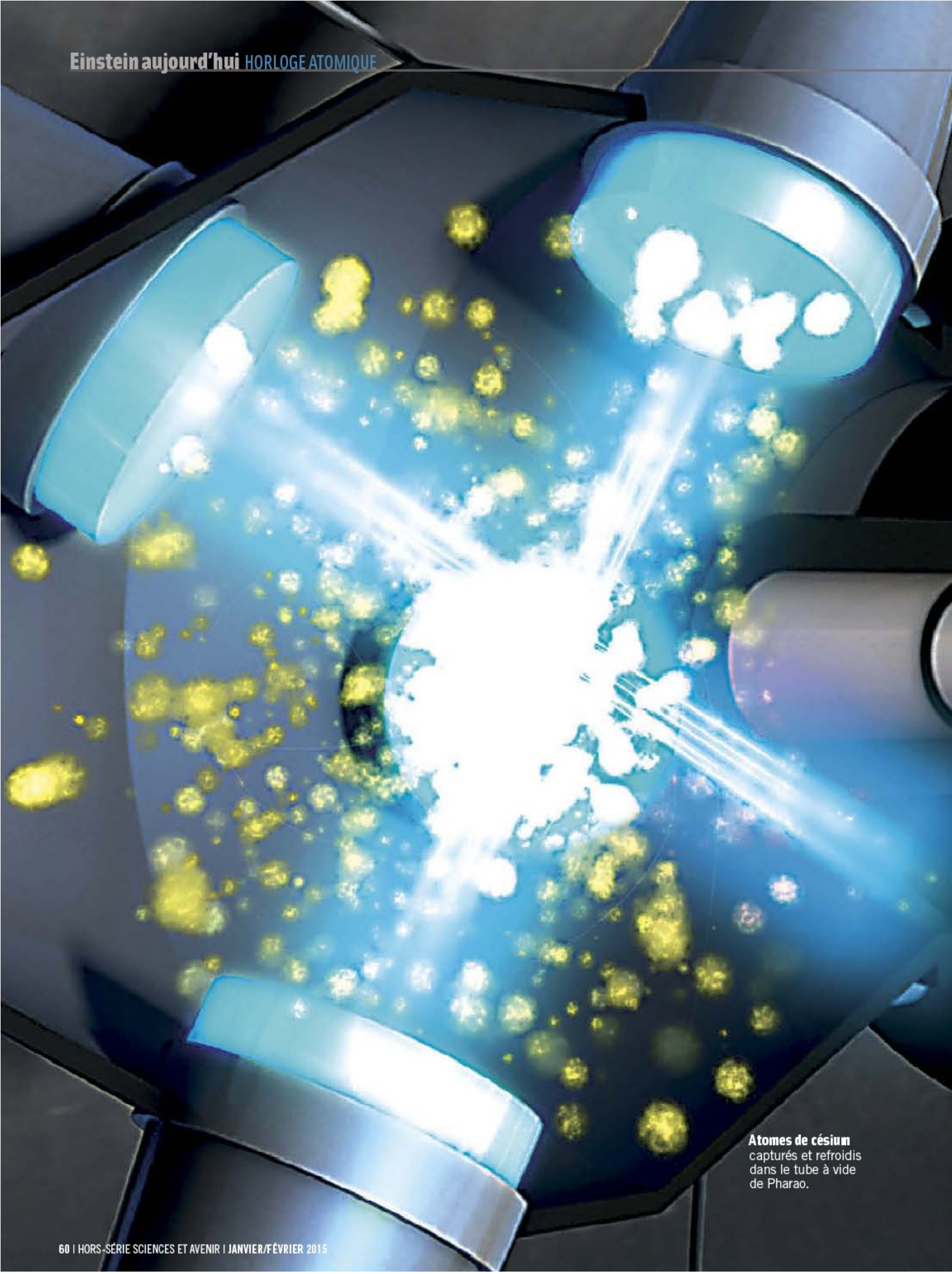
Du tri dans les théories

En revanche, les théories alternatives – qui essaient de relier les échelles quantiques et astronomiques, comme la théorie des cordes – prévoient que la gravité se comporte différemment. Et que différents facteurs conditionnent la valeur de bêta. « *C'est la raison pour laquelle nous modifions cette valeur dans nos calculs*, précise Agnès Fienga. *Et en connaissant mieux l'orbite de Mercure, nous pouvons faire le tri entre les différentes théories proposées par nos collègues.* » Jusqu'à présent, celle d'Einstein est toujours valide ! « *Mais nous continuerons à vérifier, par l'observation, les résultats des équations. Jusqu'au moment où l'amélioration des mesures nous permettra de mettre en évidence une violation, auquel cas il faudrait trouver une autre théorie que la relativité générale pour décrire les phénomènes gravitationnels observés.* »
C'est ce que le petit monde de l'astrophysique attend de la mission Bepicolombo *(lire l'encadré ci-contre)*, qui devrait, à partir de 2022, apporter sur la position de Mercure une précision de l'ordre du centimètre ! « *Mais pour l'instant, nous n'en sommes pas là…* », conclut l'astrophysicienne. D'ici un an ou deux, l'équipe de GéoAzur souhaiterait également pouvoir compléter la théorie du mouvement de Mercure avec des éléments liés à la présence de matière noire dans le Système solaire, et observer si cette matière noire a un effet détectable au niveau de la sonde. L'aventure est donc loin d'être terminée. ■

* Plus précis des catalogues réalisés avant l'invention du télescope, cet ouvrage contient la position de 1 005 étoiles, ainsi que des tables numériques et des coordonnées permettant de localiser les planètes.

MISSION BEPICOLOMBO
Du nouveau sur le noyau

C'est un nouveau voyage au long cours qui se prépare ! Bepicolombo, dont le lancement est prévu pour le mois d'août prochain, devrait être mise en orbite mercurienne autour de 2022. Cette mission d'exploration, baptisée ainsi en l'honneur du mathématicien italien Giuseppe « Bepi » Colombo (1920-1984), est développée conjointement par l'Agence spatiale européenne et l'agence spatiale japonaise Jaxa. Elle s'articule autour de deux sondes : l'une (en orbite circulaire) dédiée à l'étude de la surface et de l'intérieur de Mercure, l'autre (en orbite elliptique) à celle de sa magnétosphère. L'objectif étant non seulement d'en savoir plus sur la plus petite planète du Système solaire, mais aussi de mieux comprendre la formation et l'évolution des planètes telluriques. Quant à la précision apportée à l'éphéméride, elle devrait être… au centimètre près ! « *Cela va nous permettre de tester la relativité générale avec plus de précision*, s'enthousiasme Agnès Fienga (GéoAzur). *Donc de déterminer des contraintes plus fortes sur les théories alternatives.* »
Enfin, les données de Bepicolombo permettront sans doute de résoudre une nouvelle énigme : celle du noyau. « *On estime aujourd'hui que le noyau de Mercure est liquide*, explique l'astrophysicienne *; un résultat obtenu par la combinaison d'éléments précis sur la rotation de la planète et de données récoltées par Messenger sur le champ gravitationnel. Or, cela pose problème, car Mercure, très petite, aurait dû être la première des planètes du Système solaire à se refroidir et donc présenter un noyau solide.* » La qualité des relevés de Messenger n'est pas mise en doute, mais son orbite très excentrique a essentiellement permis d'étudier la gravité de l'hémisphère sud. « *On connaît seulement la moitié de la planète*, précise la chercheuse. *Avec Bepicolombo, on la connaîtra dans son ensemble.* »



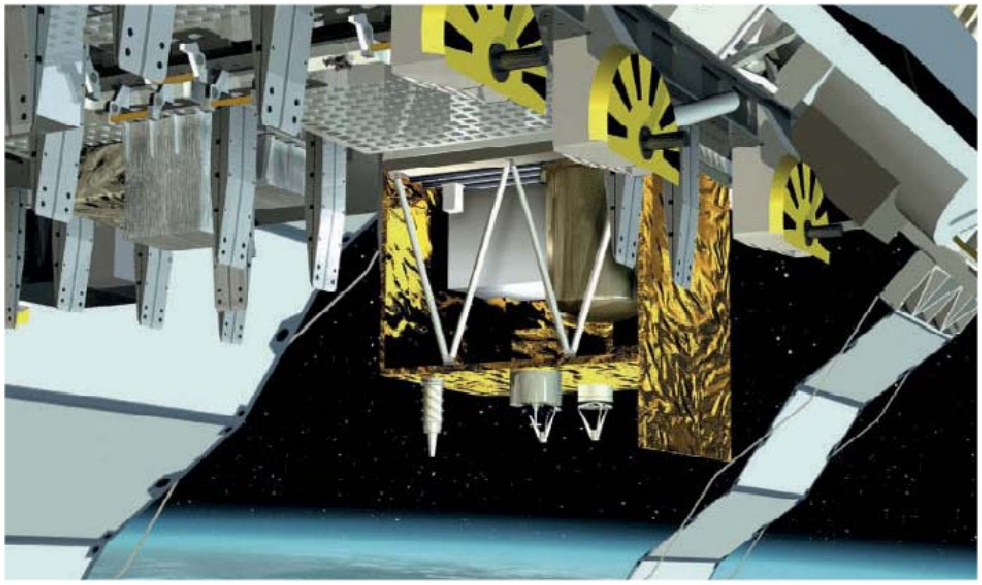
Atomes de césium capturés et refroidis dans le tube à vide de Pharao.

En **1915**, Albert Einstein prédit que le temps apparent varie selon l'intensité de la gravitation. En **2016**, la Station spatiale internationale accueillera une horloge à atomes froids qui permettra de valider ses conjectures avec une précision inégalée.

Des atomes froids et lents pour mesurer le temps

PAR PHILIPPE PAJOT

Juillet 2016 : la plateforme Aces (1), dans laquelle se trouve l'horloge Pharao (2), s'arrime au module Colombus de la Station spatiale internationale, à 400 kilomètres d'altitude. C'est la première fois qu'une horloge à atomes froids quitte la Terre pour un environnement où la gravité réduite permet des mesures d'une précision inégalée. Des mesures qui permettront de comparer le temps qu'elle délivre à celui donné par les horloges au sol les plus exactes. Mais son but sera aussi de tester le décalage gravitationnel, une des prédictions de la relativité générale d'Einstein. Les appareillages sont mis en route, tout fonctionne parfaitement. Ce succès concrétise une idée lancée par des physiciens il y a près de trente ans.



ESA/D. DUCROS

L'horloge Pharao telle qu'elle sera installée à l'extérieur de la Station spatiale internationale l'année prochaine (vue d'artiste).

Tout commence en 1989 au Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'École normale supérieure, à Paris. Là, il n'est pas encore question de mesurer le temps, mais de manipuler des atomes. Depuis quelque temps, les chercheurs s'y essaient à l'aide de lasers, un domaine de recherche qui aura un impact majeur en physique, en chimie ou en biologie (avec les pinces optiques, par exemple). Ils réussissent notamment à piéger les atomes en les refroidissant, atteignant, cette année-là, la température record de 0,000002 degré au-dessus du zéro absolu. Or, température et vitesse sont deux mesures du même phénomène : l'agitation thermique. Refroidir des atomes revient à les ralentir. Alors que l'on travaillait auparavant avec des atomes à température ambiante voyageant à 300 mètres par seconde – la vitesse d'un avion –, les atomes froids obtenus ne se déplacent qu'à quelques mètres par seconde…

Christophe Salomon, directeur de recherche au CNRS et coordinateur scientifique de Aces, se souvient : *« Dans ces premières expériences, les atomes étaient tellement lents qu'ils tombaient au fond de l'enceinte de refroidissement un peu comme des pierres : la gravité jouait sur eux. Nous nous sommes dit simplement que si l'on faisait ces expériences dans l'espace, en microgravité, ils pourraient être observés plus longtemps. »*

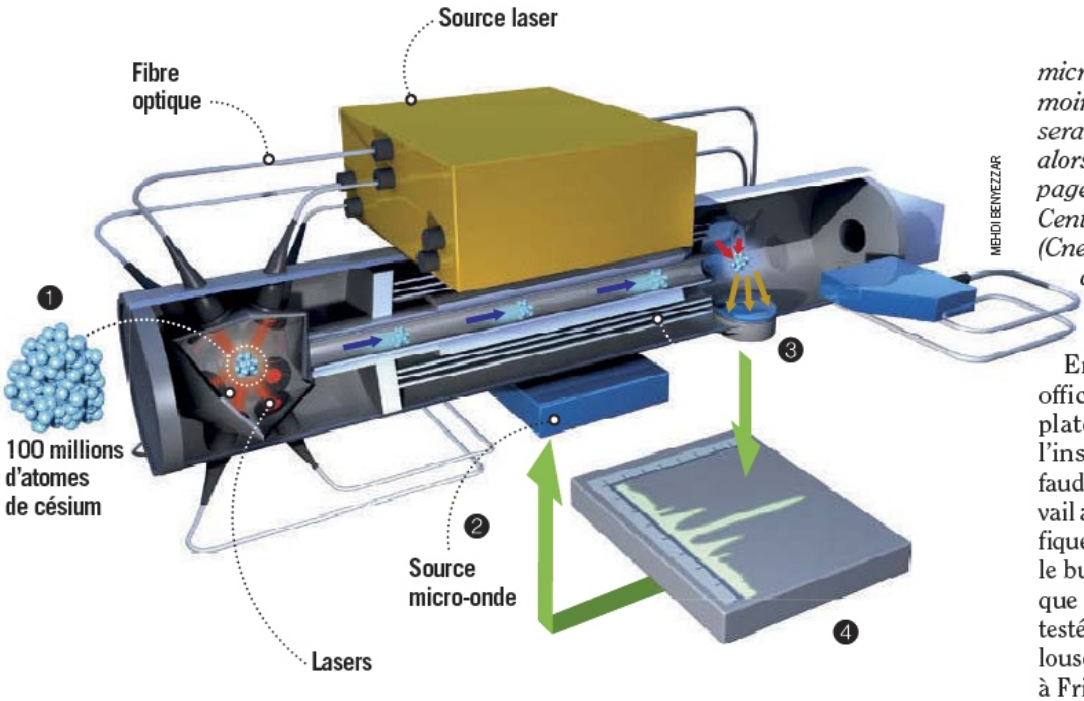
CHRISTOPHE SALOMON

« Ils étaient tellement lents qu'ils tombaient comme des pierres ! »

Christophe Salomon, coordinateur du projet Aces/Pharao

À peu près à la même époque, les atomes froids commencent à intéresser les spécialistes de la mesure du temps. Car une horloge fonctionne en comptant des battements dans un intervalle de temps. Plus on peut en compter dans un intervalle donné, plus la mesure est précise. Rien de mieux donc que les atomes, qui sont des oscillateurs naturels rapides : au lieu de battre une fois par seconde comme la trotteuse d'une montre, ceux que l'on étudie vibrent 10 milliards de fois par seconde ! De sorte qu'on obtient des instruments qui perdent moins d'une ●●●

CNES/ILL. OLIVIER SATTLER, 2011



DE VIBRATIONS EN OSCILLATIONS

La définition officielle de l'unité de temps, la seconde, est basée sur la fréquence, immuable, de vibration entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium. L'horloge atomique force un oscillateur à quartz (tel qu'en comportent les montres) à être asservi sur cette vibration.
❶ Les atomes de césium (en bleu) sortent d'un réservoir à température ambiante, à plusieurs centaines de mètres par seconde. Six lasers (en rouge), les refroidissent à une vitesse de quelques millimètres par seconde et une température d'un millionième de degré au-dessus du zéro absolu.
❷ Le nuage d'atomes se propage dans le tube. Une source micro-onde, comportant un oscillateur à quartz, émet un signal radio réglé de façon approximative sur la fréquence de vibration des atomes.
❸ Au bout du tube, des lasers mesurent la fréquence des oscillations. Le résultat est injecté dans la source micro-onde afin de corriger le signal radio pour les bouffées d'atomes suivantes (flèches vertes).
❹ Le processus est répété en continu pour maintenir le signal radio au plus près de la fréquence d'oscillation. Plus les atomes sont froids et lents, plus celle-ci est proche de la fréquence des atomes et moins la seconde varie.

●●● seconde en 300 000 ans. De quoi équiper les très précis satellites de positionnement, tel le GPS *(lire l'encadré p. 61)*.
Mais si, en théorie, les oscillations des atomes sont très stables, en pratique, cette fréquence est décalée par les perturbations extérieures (la gravitation, le champ magnétique, les collisions entre atomes, etc.). Pour minimiser celles-ci, on cherche à isoler les atomes et à ralentir leur circulation. Plus ils sont « calmes », plus leurs oscillations sont régulières et peuvent être mesurées longtemps.
Forts de leur expérience concernant les atomes ralentis, Christophe Salomon et André Clairon, de l'Observatoire de Paris, mettent au point un prototype d'horloge à atomes froids. Elle est baptisée « fontaines à atomes », car il s'agit de lancer en l'air des paquets d'atomes lents qui retombent, attirés par la gravité terrestre, comme dans une fontaine. En utilisant des atomes froids et lents, on passe d'un temps de mesure d'environ 5 millisecondes dans une horloge atomique classique à une demi-seconde dans une fontaine atomique, soit une durée cent fois supérieure. On mesure ainsi avec une précision accrue la fréquence d'oscillation des atomes, l'équivalent de la trotteuse de notre montre.
« *Lorsque nous avons réussi, en 1991, à montrer le principe de cette fontaine atomique, nous avons tout de suite réalisé qu'en microgravité, les atomes tombant moins vite, les temps de mesure seraient encore plus longs. J'ai alors envoyé une note de quatre pages au directeur général du Centre national d'études spatiales (Cnes) pour lui expliquer l'intérêt des atomes froids dans l'espace* », raconte Christophe Salomon.

■ TOUT SAVOIR SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE
dans les Repères pp. 46-49

En 1997, le projet Aces est officiellement lancé. Aces est la plate-forme dont Pharao sera l'instrument principal. Mais il faudra encore quinze ans de travail acharné de la part des scientifiques et des industriels pour voir le but : ce n'est qu'en juillet 2014 que le modèle de vol de Pharao, testé avec succès par le Cnes à Toulouse, est livré sur le site d'Airbus à Friedrichshafen, près du lac de Constance (Allemagne). La phase d'intégration avec les autres éléments de la plate-forme Aces commence. Elle va durer jusqu'au lancement, en 2016.

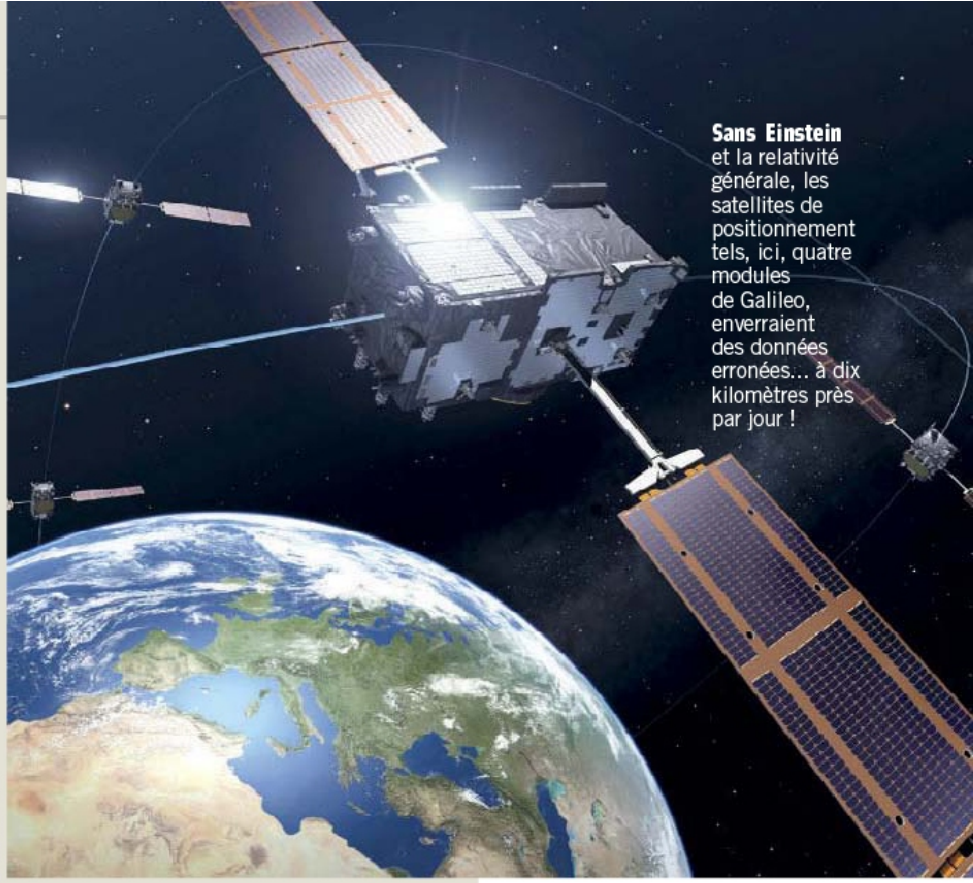
Refroidi à un millionième de degré

À l'Observatoire de Paris, l'astronome Philippe Laurent, responsable des instruments, ne cache pas sa satisfaction. Derrière lui, accroché au mur, trône un plan à l'échelle 1 de Pharao auquel il se réfère pour en montrer les différentes parties, notamment le tube à atomes de césium, le cœur de l'horloge. Dans ce tube, lorsque Pharao sera en orbite, le nuage d'atomes refroidi à un millionième de degré se déplacera à 5 centimètres par seconde, ce qui permettra une durée de mesure de l'ordre de dix secondes, dix fois supérieure à ce qui est réalisable au sol. Après avoir passé plus de vingt ans à travailler sur Pharao, Philippe Laurent est soulagé, mais sa tâche n'est pas achevée : « *Maintenant que le modèle de vol est livré, nous allons pouvoir nous consacrer enfin à la préparation de l'analyse des données afin de remplir le programme scientifique !* »
Un programme ambitieux. « *La première grosse application scientifique consistera à mesurer avec précision le décalage gravitationnel prédit par Einstein* », explique Christophe Salomon. Dans sa

Le GPS, réglé à la microseconde près

Les satellites de géolocalisation, GPS, Galileo ou autres, emportent avec eux des horloges atomiques. Car l'exactitude du positionnement à la surface terrestre dépend de la précision des horloges dans l'espace ! Imaginez que vous vouliez vous situer à 10 mètres près. Les signaux se propageant à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s), ils parcourent 10 mètres en 30 milliardièmes de seconde (30 nanosecondes). Les horloges atomiques des GPS doivent donc être précises à moins de 30 nanosecondes près. À priori, pas de problème, car leur précision intrinsèque est bien meilleure, et elles sont recalées périodiquement par des horloges au sol.

Mais il faut compter avec la relativité d'Einstein, qui stipule que l'écoulement du temps peut se modifier. Il est ralenti pour les objets en mouvement (effet de relativité restreinte), avec pour conséquence, dans ce cas, moins 7 microsecondes par jour. Reste que cet effet est contrarié par le décalage gravitationnel, précisément celui que Pharao va mesurer avec une grande précision : le temps s'écoule plus vite dans un champ de gravitation plus faible, de 45 microsecondes par jour pour un GPS par rapport à notre temps. Au total, la relativité accélère les horloges de GPS de 38 microsecondes par jour (45 - 7). Si tous ces phénomènes relativistes n'étaient pas pris en compte, l'indication fournie par le GPS serait décalée de 10 kilomètres par jour… De quoi se retrouver loin de sa destination !



ESA/PIERRE CARRIL

Sans Einstein et la relativité générale, les satellites de positionnement tels, ici, quatre modules de Galileo, enverraient des données erronées… à dix kilomètres près par jour !

théorie de la relativité élaborée en 1915, le physicien calcule en effet que la lumière doit être déviée par le champ gravitationnel. Déduction vérifiée par l'astronome britannique Arthur Eddington lors de l'éclipse de Soleil de 1919 *(lire aussi pp. 46-49)*.

Mais une autre de ses prédictions sera plus longue à avérer : le fait que le temps apparent varie selon l'intensité de la gravitation. Autrement dit, qu'une horloge doit battre plus rapidement quand elle est loin et vue de la Terre. La démonstration en a été faite pour la première fois par les Américains Robert Pound et Glen Rebka qui, en 1959, ont comparé les battements de l'oscillation d'un atome de fer mesurés en bas d'une tour à ceux d'un atome situé 22,5 mètres plus haut. Puis elle a été confirmée en 1978, lorsque les scientifiques ont confronté une horloge placée dans une fusée à une autre restée au sol. Grâce à Pharao, cette mesure sera améliorée d'un facteur 30. *« Si l'on décèle un écart par rapport à la prédiction, ce sera le signe qu'il existe une théorie au-delà de la relativité générale »*, confie Philippe Laurent.

Outre ces mesures sol-espace, Pharao permettra également des comparaisons sol-sol. L'objectif sera de valider un nouveau type d'horloges atomiques : les horloges optiques. Alors qu'une fontaine atomique mesure des oscillations dont la fréquence est de dix milliards de cycles par seconde (10^{10} Hz), une horloge optique, qui utilise également des atomes froids mais selon une technique différente, mesurera des oscillations dix mille fois plus rapides (10^{15} Hz). Toutefois, pour que ces appareils passent de leur statut actuel de prototype à celui d'instrument utilisable en métrologie, il faut que leur fiabilité soit vérifiée. Une vingtaine de groupes scientifiques dans le monde doivent s'assurer que les prototypes fonctionneront de manière optimale lorsque Pharao passera au-dessus d'eux. À terme, les horloges optiques perdront moins d'une seconde en 13 milliards d'années, l'âge de l'Univers. Une précision redoutable qui ouvre notamment la perspective de mesurer d'une nouvelle manière la gravitation.

Et si l'on veut faire encore mieux ? Il faudra mettre des horloges optiques dans l'espace pour ralentir davantage les atomes. *« Une horloge optique est plus complexe qu'une fontaine atomique. Et comme il aura tout de même fallu près de vingt ans pour faire voler Pharao, je ne suis pas sûr d'être là pour en voir une en orbite ! »*, s'amuse Christophe Salomon. ■

Explications et vidéos : cnes.fr, mots clés : pharao supermachine

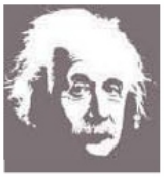
http://smsc.cnes.fr/PHARAO/Fr/GP_galerie.htm

PHILIPPE LAURENT

« Si l'on décèle un écart par rapport à la prédiction, ce sera le signe qu'il existe une théorie au-delà de la relativité générale ! »

Philippe Laurent, responsable des instruments de Pharao

1. Atomic Clocks Ensemble in Space.
2. Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite.



En **1905**, Einstein met en équation le mouvement aléatoire de particules. Appliqué à la finance, le modèle brownien est l'une des causes du krach de **2008**.

Les marchés boursiers livrés au hasard

PAR FRANCK DANINOS

À Châtenay-Malabry, au sud de Paris, une dizaine de chercheurs analysent chaque jour, à l'aide de supercalculateurs, des quantités colossales de données issues des transactions boursières. Rattachée à l'École centrale de Paris, l'équipe de la Chaire de finance quantitative, subventionnée en partie par BNP Paribas, teste de nouvelles hypothèses pour évaluer les risques et déterminer le prix des actions, mais aussi pour comprendre plus finement les lois qui régissent l'ensemble du système financier. *« Depuis le krach de 2008 qui a fait vaciller l'économie internationale, tout a été mis à plat. On ne réfléchit plus comme avant. Nos approches sont plus complexes, globales, pluridisciplinaires. Et s'inspirent beaucoup des méthodes développées par les physiciens »*, explique Frédéric Abergel, 52 ans, directeur de la chaire.

Chercheur au CNRS pendant plus de dix ans dans le domaine des mathématiques appliquées, l'homme a ensuite travaillé dans les salles de marché, sur le prix des actions et des matières premières notamment, pour des banques d'investissement telles que Natixis et Barclays. Puis, un an avant le séisme de 2008, il est retourné dans le monde académique, à l'École centrale de Paris, *« afin de mieux réfléchir sur les pratiques de l'industrie financière et les modélisations mathématiques qu'elle utilisait pour décrire les mouvements du marché. Force est de reconnaître que la plupart de ces modèles étaient idéalisés, pas assez précis et donc dangereux »*. Les banques et les compagnies d'assurance leur accordaient une confiance excessive, avec une avalanche de pertes et les conséquences que l'on sait. Et les modèles dits « browniens » ont joué un rôle central dans cette hécatombe.

La marche de l'ivrogne

Ces modèles doivent leur nom au botaniste écossais Robert Brown (1773-1858) qui, en 1827, sous son microscope, a observé le mouvement chaotique et incessant de grains de pollen à la surface de l'eau. Ce phénomène est resté mystérieux jusqu'en 1905, quand Albert Einstein en a fourni l'explication : les grains sont entraînés par une kyrielle de molécules d'eau qui s'entrechoquent et s'agitent dans toutes les directions. Ils zigzaguent ainsi autour de leur position initiale, ne s'en éloignant jamais beaucoup, selon une loi statistique qui dépend de la racine carrée du temps d'observation *(lire pp. 36-38)*. Ce processus de « marche aléatoire », surnommé aussi « marche de l'ivrogne » (qui, ne sachant plus où il habite, titube au hasard dans un sens, puis dans un autre, autour d'un point fixe), permet d'expliquer quantité de phénomènes physiques – une fumée de cigarette qui se dissipe dans l'air, un nuage de lait qui se mélange avec du thé…

Cinq ans avant Einstein, le mathématicien Louis Bachelier (1870-

Les traders se comportent d'une manière mimétique et grégaire. Résultat : des phénomènes d'emballement sur les marchés financiers, qui n'obéissent pas au hasard sage du mouvement brownien.

■ TOUT SAVOIR SUR LE MOUVEMENT BROWNIEN
dans les Repères pp. 36-38

GETTYIMAGES

1956) avait associé ce même mécanisme de marche aléatoire aux variations de la Bourse de Paris. En analysant le cours des rentes financières émises par le Trésor, qui pouvaient être marchandées par des courtiers selon l'offre et la demande, il avait constaté que leur prix était soumis à une infinité de facteurs, à une multitude d'ordres d'achat ou de vente fondés sur des opinions contradictoires – un peu comme un grain de pollen frappé en permanence et de toutes parts par des myriades de molécules d'eau. Et de conclure, à l'inverse de ce que la plupart des gens croyaient alors : *« Le marché n'obéit qu'à une seule loi : le hasard. »* Prédire le cours de la Bourse était donc tout aussi incertain que lire l'avenir dans du marc de café !

SPL/COSMOS

Les observations de Robert Brown sur le déplacement de pollen dans l'eau ont connu des développements inattendus en économie.

Il était néanmoins possible, d'après Bachelier, de caractériser l'ampleur des variations d'un titre autour d'une valeur moyenne – ce qu'on appellera la « volatilité » ou encore le « risque » du marché. Il considérait qu'à un instant donné, les éléments d'information arrivaient de manière aléatoire et indépendante dans les milieux financiers. Traduite en termes mathématiques, leur « agrégation » conduisait à une loi de probabilité dite « gaussienne ». Une courbe en forme de cloche, autrement dit, dont les deux extrémités représentaient les fluctuations les plus importantes et les plus rares – comme pour la distance parcourue par les grains de pollen depuis leur position initiale.

Mal reçus, tombés dans l'oubli, les travaux de Bachelier ont été redécouverts dans les années 1950 par l'Américain Paul Samuelson, prix Nobel d'économie, avant d'être appliqués au monde de la finance au début des années 1970 par Fischer Black, Myron Scholes et Robert Merton, trois autres économistes nord-américains. *« Leurs modèles browniens ont fourni des outils simples, commodes et intellectuellement rassurants pour évaluer le risque des placements en se fondant sur la seule volatilité du marché »*, explique Christian Walter, spécialiste de mathématiques financières et responsable du programme Histoire et épistémologie de la finance à la fondation Maison des sciences de l'homme. À partir des années 1990, la formule brownienne de Black, Scholes et Merton et ses différents avatars ont été ●●●

●●● utilisés à l'envi pour calculer le prix des options et de leurs produits dérivés ou négocier des primes d'assurance.

F. ABERGEL

« Force est de reconnaître que la plupart des modèles mathématiques utilisés par l'industrie financière étaient idéalisés »

Frédéric Abergel, Chaire de finance quantitative, École centrale de Paris

Loi de puissance

Avec de nombreux autres mathématiciens et spécialistes de l'économétrie, Benoît Mandelbrot (1924-2010), père de la géométrie fractale, avait pourtant tiré la sonnette d'alarme. Les modèles browniens sous-estimaient, selon lui, l'importance des événements rares, extrêmes, par exemple une action perdant plus de 5 % en un jour *(lire l'encadré p. 67)*. Ces grandes variations étaient bien plus fréquentes que le hasard « sage » et bien lissé des modèles browniens ne le laissait supposer. Plusieurs travaux révélaient en effet une instabilité intrinsèque des marchés. Loin d'être guidés par la seule logique du profit individuel, ils étaient soumis à des phénomènes d'emballement sans cause apparente, à des comportements mimétiques, grégaires, où les traders se mettaient à vendre ou acheter les mêmes titres en même temps.

Ces mouvements extrêmes apportaient, par ailleurs, des informations cruciales à la compréhension des marchés, auxquelles les modèles browniens restaient aveugles. Ainsi de la répartition des richesses au sein d'une population, où un petit nombre d'individus en possèdent la majeure partie : raisonner en termes de moyenne n'a alors aucun sens. Les comportements statistiques obéissent, dans ce cas, à ce que les mathématiciens nomment une « loi de puissance ». Elle se traduit, graphiquement, par une courbe qui plonge très vite avant de s'incurver et de s'étaler lentement jusqu'au bord – où un nombre relativement important d'événements extrêmes est représenté. Pour Mandelbrot, l'activité financière suivait une telle loi, et non une loi gaussienne, qui met des informations essentielles sous le tapis.

L'avenir allait lui donner raison. Et de quelle manière ! En 2007, par exemple, la banque d'investissement new-yorkaise Goldman Sachs subira des variations de cours pourtant « impossibles » – car selon les modèles browniens, de telles fluctuations ne peuvent se produire qu'une fois… en plusieurs centaines de millions d'années !

Depuis le krach de 2008, une prise de conscience s'est faite : les modèles browniens, trop simplistes, faussent les estimations et minimisent les risques encourus. Les mathématiciens s'efforcent donc de les remplacer par de nouvelles équations intégrant les lois de puissance. Mais les pistes qu'ils explorent vont bien au-delà. Pour rendre les modèles toujours plus réalistes, ils s'appuient sur un domaine de recherche qui connaît un essor remarquable depuis cinq ans : l'« éconophysique ». Il consiste à appliquer à l'économie et à la finance des méthodes développées par les physiciens pour étudier les systèmes complexes. Des systèmes formés d'un grand nombre d'entités qui réagissent à de faibles variations de leur environnement et dont le comportement collectif engendre de nouvelles propriétés – à l'instar d'un manteau neigeux qui s'écroule subitement sous l'effet d'une petite pression mécanique.

Des échanges difficiles

« L'impulsion est venue des physiciens eux-mêmes, raconte Raphaël Douady, cofondateur de la société Riskdata et directeur académique du Laboratoire d'excellence sur la régulation financière, organisme né d'une coopération entre l'université Panthéon-Sorbonne, l'ESCP, le Conservatoire national des arts et métiers et l'ENA. *Certains, comme Gene Stanley, de l'université de Boston, ou Yaneer Bar-Yam, de l'Institut*

Photographiée à haute vitesse, une goutte de sang tombant dans de l'eau. Les molécules de l'une et de l'autre se mélangent de manière aléatoire.

SPL/COSMOS

des systèmes complexes du Massachusetts, ont réalisé que les problèmes qu'ils traitaient n'étaient pas si éloignés de ceux auxquels les économistes étaient confrontés : décrire le comportement collectif d'une multitude d'éléments en interaction. » Entre physiciens et économistes, les échanges sont parfois difficiles : les uns n'ont pas toujours les connaissances suffisantes en matière d'économie ; les autres butent sur des mathématiques de très haut niveau. « *Mais les physiciens apportent des idées neuves, d'autres façons de penser, qui peuvent faire émerger de nombreuses applications* », pointe le chercheur.

Le « gel » de la planète finance

À Châtenay-Malabry, avec l'aide de physiciens statisticiens, l'équipe de la Chaire de finance quantitative développe ainsi des modèles très fins dont les éléments de base, qui représentent un donneur d'ordre, sont traités aux niveaux à la fois individuel et collectif : chacun est sensible au comportement des autres, à leurs stratégies de trading, à la rétroaction des évolutions du système sur son propre comportement… Ils sont « intelligents », pour ainsi dire, contrairement aux modèles browniens où les comportements des donneurs d'ordre sont considérés comme indépendants les uns des autres. Hasard et probabilités occupent toujours une place essentielle, mais la marche n'est plus tout à fait aléatoire et les statistiques ne sont plus gaussiennes. « *Ces travaux doivent être encore affinés*, confie le directeur Frédéric Abergel. *Ils requièrent une énorme puissance de calcul et de nombreuses informations sur l'état des marchés, pas toujours faciles à obtenir. Mais ils permettront de réaliser des estimations plus précises sur les mouvements boursiers.* »

Une autre application de l'économie-physique concerne la stabilité des marchés. Il s'agit, dans ce cas, de s'appuyer sur la physique des « transitions de phase » – comme la transformation de l'eau en glace. Sous certaines conditions, l'eau reste liquide en dessous de 0 °C. On parle alors d'état « métastable », car la moindre perturbation – tel le contact d'une pointe d'aiguille – entraîne aussitôt, de proche en proche, la cristallisation de ses molécules. Un phénomène un peu similaire se serait produit dans le monde de la finance en septembre 2008 ! La faillite de la banque new-yorkaise Lehman Brothers a joué le rôle de l'aiguille : elle a fait « geler » la planète finance qui se trouvait dans un état « métastable ». Ainsi, les équations associées aux transitions de phase permettent aux mathématiciens de modéliser la réponse et la stabilité des marchés face à des événements extrêmes ou des ordres d'achat automatisés et ultra-rapides, à l'échelle de la milliseconde. À terme, ils pourraient fournir des systèmes d'alerte très précieux pour anticiper les crises.

« *L'économie et les mathématiques financières entrent dans un nouveau paradigme*, annonce Raphaël Douady. *Ils vivent une période un peu équivalente à celle qu'a connue la physique au début du XX^e siècle, avant qu'Einstein ne bouleverse tout.* » ■

Christian Walter, *Les Origines du modèle de marche aléatoire en finance*, Economica, 2013

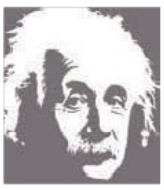
Christian Walter et Michel de Pracontal, *Le Virus B : crise financière et mathématiques*, Seuil, 2009

Peter Bernstein, *Des idées capitales*, PUF, 2008

Benoît Mandelbrot et Richard Hudson, *Une approche fractale des marchés*, Odile Jacob, 2005

Quand les traders dilatent le temps

Dès la fin des années 1960, des mathématiciens comme Benoît Mandelbrot, inventeur des fractales, ou Peter Clark, de l'université du Minnesota, avaient pressenti que le temps absolu et continu des modèles browniens n'était pas la meilleure horloge pour mesurer les fluctuations du marché. « *Comme si l'intensité des échanges – en particulier les transactions boursières concernant plusieurs centaines de milliers de titres – contractait ou dilatait le temps calendaire, de même que l'intensité gravitationnelle contracte ou dilate le temps dans la théorie de la relativité générale !* », explique Christian Walter. Ces dernières années, l'idée d'une relativité et d'une discontinuité du temps en fonction de l'activité boursière a été reprise par d'éminents spécialistes des mathématiques financières, comme Hélyette Geman, de l'université Paris-Dauphine, ou Peter Carr, de l'université de New York. Ils l'intègrent à leurs modèles, qui décrivent beaucoup mieux que les outils browniens les variations de cours et les risques du marché.



En **1905**, Einstein explique comment une plaque de métal frappée par de la lumière peut produire de l'électricité. En **2015**, les panneaux photovoltaïques tirent parti de cet effet pour capturer de plus en plus efficacement les rayons du Soleil.

Un siècle de **révolutions** solaires

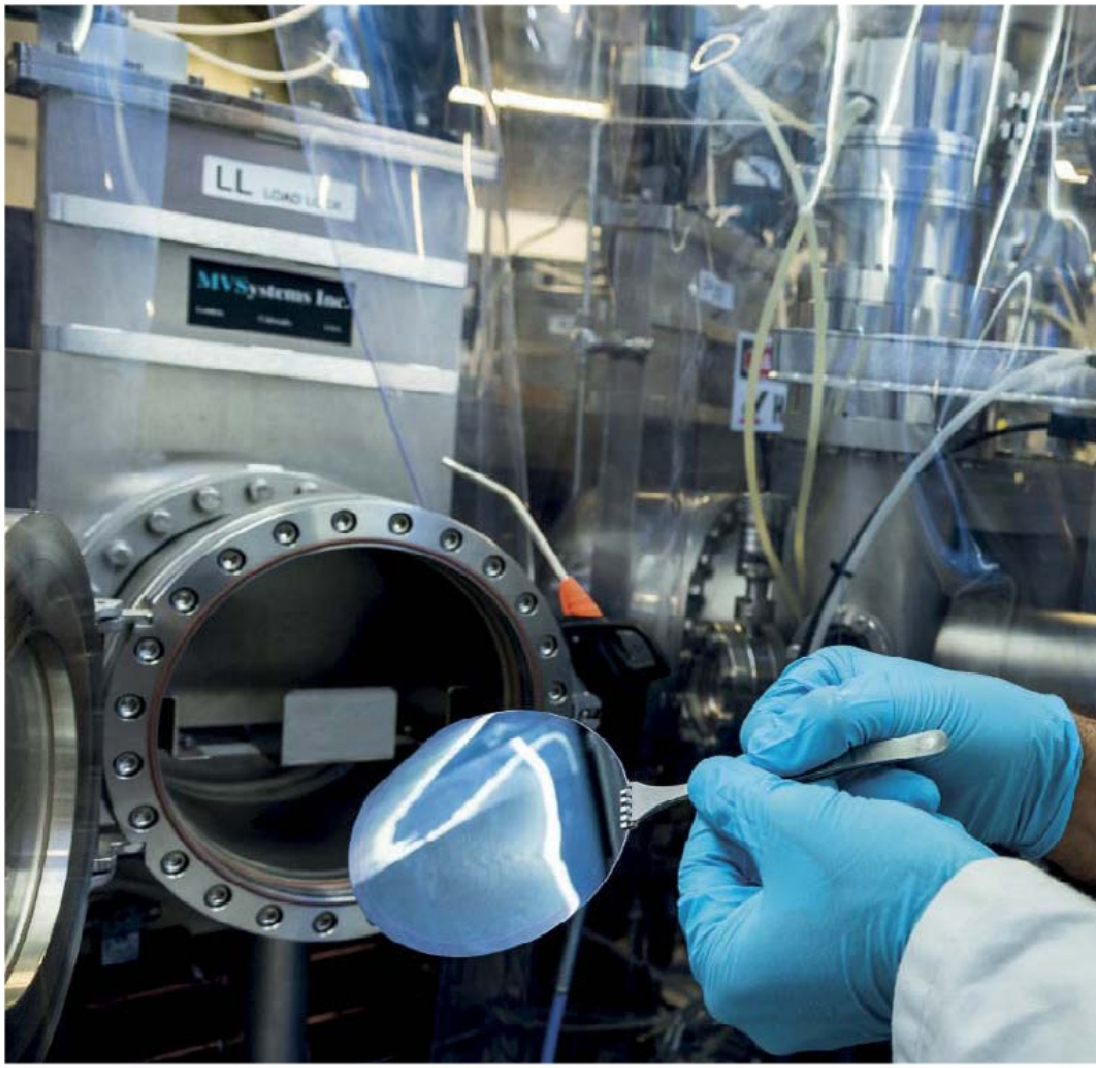
PAR AUDREY BOEHLY

En France, la plus grande ferme solaire a été inaugurée aux Mées (Alpes de Haute-Provence) en 2011 (ci-dessus). Ses six centrales peuvent produire jusqu'à 100 mégawatts.

MATTHIEU COLIN/DIVERGENCE

Un peu plus de cent ans. Voilà ce qu'il aura fallu à l'énergie photovoltaïque pour enfin trouver sa place au Soleil parmi les sources de production d'électricité. C'est en 1905 qu'Albert Einstein explique pour la première fois comment un matériau exposé à la lumière peut générer de l'électricité. Ce phénomène, appelé « effet photoélectrique » *(lire pp. 39-41)*, est à l'œuvre dans tous les panneaux solaires actuels. Pour sa découverte – et non pour celle de la relativité ! –, le physicien reçoit en 1921 le seul prix Nobel de sa carrière. Cette théorie, qu'il qualifie lui-même de « révolutionnaire », avance que la lumière ne se comporte pas seulement comme une onde mais aussi comme un ensemble de particules, que l'on appellera photons. À une certaine fréquence, ils peuvent transmettre leur énergie aux électrons d'un matériau. Ces derniers sont alors excités et capables de former un courant électrique.

Aujourd'hui, l'industrie du photovoltaïque a atteint une maturité suffisante pour produire de l'électricité pratiquement au même prix que celle distribuée par le réseau. Et à l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF) – un pôle d'excellence dédié à l'énergie solaire –, les chercheurs travaillent déjà au développement de la prochaine génération de cellules solaires. Actuellement, les installations – principalement des panneaux à base de silicium – sont capables de produire environ 160 térawattheures d'électricité par an à l'échelle mondiale, l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 45 millions de foyers européens. Une capacité multipliée par six en quatre ans. *« Cette source d'électricité renouvelable a maintenant les moyens de se tailler une vraie place dans* ●●●



PATRICE LATON/LOOKAT SCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

●●● *notre mix énergétique »*, analyse Pere Roca i Cabarrocas, directeur du LPICM à Palaiseau (Laboratoire de physique des couches minces), qui participe à l'IPVF. *« La course à l'équipement est lancée au niveau mondial »*, confirme Daniel Lincot, directeur scientifique de l'IPVF.

En pleine guerre froide

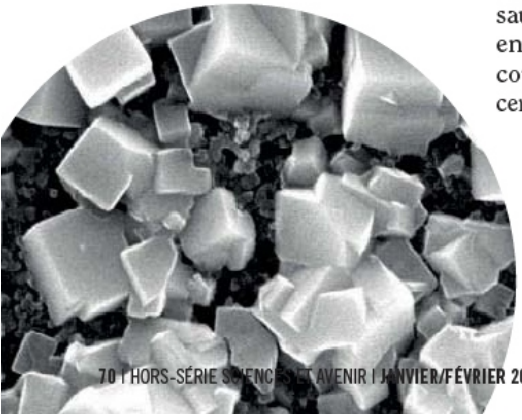
Un sprint, comparé au développement du photovoltaïque jusqu'ici, qui ressemblait plutôt à une course de fond. Pendant la première moitié du XXe siècle, suite aux travaux d'Einstein, certains chercheurs tentent de mettre au point des cellules solaires à base de sélénium. Mais malgré leurs efforts, pas moyen de faire décoller leur rendement énergétique: aucune d'elles n'est capable de transformer plus de 1 % de l'énergie solaire en électricité… un score dérisoire qui ne permet pas d'envisager des applications.

Il faut attendre les années 1950 pour qu'émerge une véritable rupture technologique. À cette époque, Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson, chercheurs au sein de la compagnie américaine de téléphone Bell, présentent le premier prototype de cellule solaire à base de silicium. Initialement développé pour l'électronique, le silicium s'avère, un peu par hasard, un excellent matériau photovoltaïque: son rendement frôle les 6 %. En quelques mois de recherche, il grimpe même à plus de 10 % ! Dans ses colonnes, le *New York Times* s'enthousiasme. *« [Ces travaux] signent peut-être le début d'une nouvelle ère, pouvant conduire à terme à la réalisation de l'un des rêves les plus chers de l'humanité – la mobilisation de l'énergie presque illimitée fournie par le Soleil au bénéfice de la civilisation »*, écrit-il. Malgré tout, le coût de l'électricité solaire reste prohibitif: en 1956, Chapin calcule qu'il faudrait débourser pas moins de 1,4 million de dollars pour alimenter intégralement une maison standard en énergie ! *« Les cellules nécessitent l'utilisation d'un silicium pur à plus de 99,9 %, dont le coût de fabrication est élevé »*, décrypte aujourd'hui Daniel Lincot.

À ce prix-là, personne ne peut se payer le luxe de l'énergie solaire… sauf l'armée américaine lancée, en pleine guerre froide, dans la course à l'espace. Pour remplacer les batteries conventionnelles dans les satellites – dont la longévité ne dépasse pas quelques jours –, les Américains mettent en orbite en 1958 le premier engin spatial équipé de panneaux solaires, coiffant les Soviétiques au poteau. Entre 1958 et 1969, le gouvernement américain investit plus de 50 millions de dollars dans la recherche photovoltaïque, un effort qui permet d'atteindre 15 % de rendement et de faire chuter les prix d'environ 60 %.

Sur Terre, le solaire fait son apparition en site isolé, où il alimente des installations dans des secteurs comme l'industrie pétrolière, les télécommunications ou les réseaux ferroviaires. *« Ce n'est qu'à partir des années 2000, avec la remontée des cours du pétrole et la prise de conscience environnementale, que certains gouvernements commencent à subventionner le photovoltaïque. Très vite, de nouveaux marchés s'ou-*

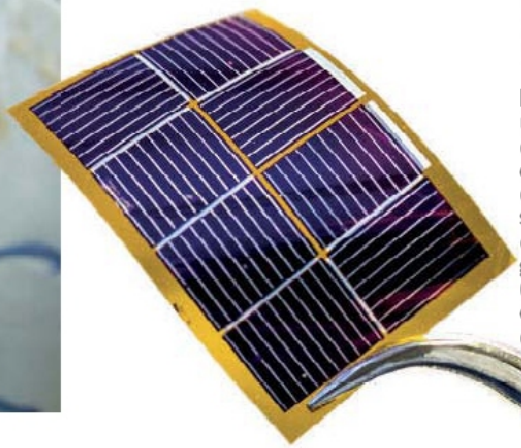
John Perlin, *From Space to Earth. The Story of Solar Electricity,* Earthscan, 1999 (en anglais)



SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

La pérovskite, un cristal semi-conducteur, offre l'une des pistes les plus prometteuses dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Non seulement son rendement énergétique culmine déjà à 19%, pas loin derrière le silicium, mais son coût de fabrication serait cinq fois moindre que ce dernier.

LPICM



POUR QUELQUES MICROMÈTRES DE MOINS

Le dépôt par plasma est une technique utilisée par le Laboratoire de physique des couches minces pour fabriquer des cellules photovoltaïques (ci-contre). Il s'agit d'injecter un gaz contenant des atomes de silicium dans une enceinte sous vide, puis d'arracher des électrons aux molécules gazeuses à l'aide d'un champ électrique (ci-dessus). En réagissant avec une surface, ce plasma s'y dépose en une fine couche de quelques micromètres (page de gauche).

PATRICE LATOM/LOOKATSCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

vrent », raconte Daniel Lincot. Jusqu'ici, le silicium utilisé était issu des déchets de l'industrie électronique mais, dès 2003, la demande est telle qu'il faut ouvrir des usines dédiées. *« Aujourd'hui, on fabrique chaque année plus de 300 000 tonnes de silicium pour le solaire, dix fois plus que pour l'électronique »*, précise le chercheur. Une production de masse qui fait rapidement chuter le prix des panneaux photovoltaïques. Après quarante ans d'une lente progression, le rendement record des cellules à base de silicium flirte désormais avec les 26 % (15 % en moyenne pour les panneaux commerciaux)… loin toutefois derrière les modélisations théoriques, qui prévoient jusqu'à 85 %.

« On sait qu'on en a encore sous le pied! », confirme Daniel Lincot. Un constat qui alimente une véritable effervescence dans ce domaine de recherche. Entre 2004 à 2009, le nombre de brevets consacrés au photovoltaïque a augmenté de plus de 60 %. L'objectif des scientifiques : faire chuter le prix du kilowattheure. Notamment en faisant subir une cure d'amaigrissement au silicium, qui contribue encore au tiers du coût d'un panneau.

Dix fois plus fin qu'un cheveu

C'est l'idée explorée par le LPICM, qui travaille sur la technique des couches minces. *« Les plaquettes de silicium couramment utilisées mesurent environ 200 micromètres d'épaisseur,* explique Romain Cariou, doctorant au laboratoire. *Dans le cas des couches minces, celle-ci ne dépasse pas quelques micromètres. »* Soit dix fois moins que l'épaisseur d'un cheveu. Une finesse impossible à obtenir par la méthode de production classique consistant à découper en tranches des lingots de silicium. Il faut avoir recours à un autre procédé, comme celui dit de dépôt par plasma. Déjà utilisée industriellement pour produire des écrans plats, la technique (voir ci-dessus) permet aux chercheurs du LPICM de déposer des ●●●

COURTESY D. LINCOT

« On fabrique chaque année plus de 300 000 tonnes de silicium pour le solaire, dix fois plus que pour l'électronique ! »

Daniel Lincot, directeur scientifique de l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France

●●● couches micrométriques sur du verre ou du plastique. *« En couche mince, le silicium peut atteindre jusqu'à 20 % de rendement »*, précise le doctorant.
De bonnes performances, qu'il est néanmoins possible de pousser plus loin. Pour y parvenir, les scientifiques tentent d'augmenter la quantité de lumière absorbée par la cellule solaire. *« Le silicium n'est pas très efficace pour capter le rayonnement lumineux »*, explique Martin Foldyna, chargé de recherche au LPICM. Il a surtout pour lui sa stabilité et sa capacité à être un bon conducteur. *«Mais si nous parvenons à accroître le nombre de photons capturés, nous intensifions de fait le courant produit »*, poursuit le chercheur.

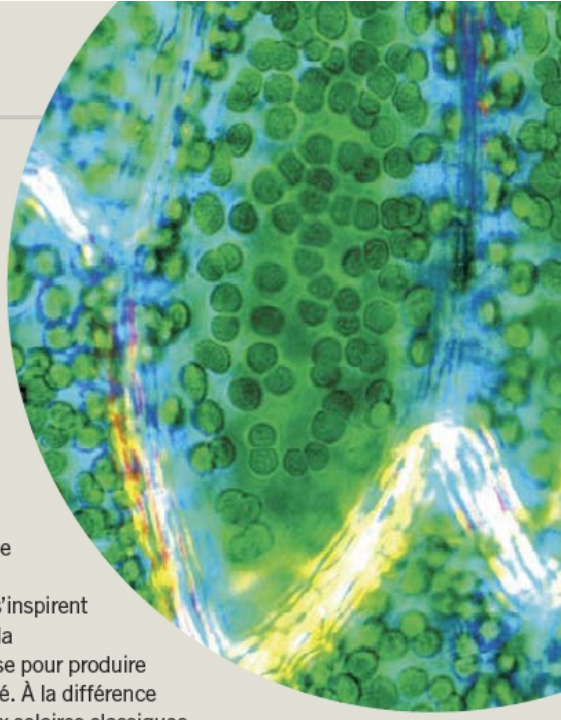
Millefeuilles de semi-conducteurs

Le jeune chercheur et son équipe ont donc mis au point une interface capable de piéger la lumière: une surface recouverte d'un tapis de nanofils enrobés de silicium. Ces minuscules fils d'une centaine de nanomètres de diamètre et d'à peine un micromètre de hauteur forment une véritable forêt dans laquelle s'engouffre la lumière. *« Le procédé n'en est qu'à ses débuts mais d'après les premiers résultats, le trajet des photons est multiplié par 15, favorisant ainsi leur absorption »*, rapporte Martin Foldyna.
Pour capter davantage de photons, une autre approche consiste à empiler plusieurs couches de matériaux présentant des gammes d'absorption différentes, ce qui permet de couvrir une plus grande part du spectre lumineux. Ces cellules dites multijonctions peuvent atteindre des rendements record, jusqu'à 46 % pour les plus élaborées qui sont de véritables millefeuilles de semi-conducteurs. *« Elles sont néanmoins complexes à fabriquer et donc assez coûteuses »*, tempère Daniel Lincot. Pour la production de masse, on s'oriente plutôt vers des cellules dites tandem, ne comportant que deux couches superposées. *« À terme, on ajoutera probablement un matériau en couche mince à la surface des panneaux actuels en silicium afin d'améliorer leur rendement »*, prédit le chercheur.

PATRICE LATRON/LOOKATSCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

Une centrale solaire au cœur des plantes

Il est partout ! L'effet photoélectrique est à l'œuvre tout autour de nous, dans les algues, les plantes et certaines bactéries. Sans lui, il n'y aurait pas de photosynthèse ! Au cœur de certaines cellules végétales se niche en effet une usine miniature, capable de transformer l'énergie du Soleil. Pour capter celle-ci, les plantes utilisent un pigment : la chlorophylle. Cette molécule absorbe la majeure partie du rayonnement visible à l'exception du vert. Lorsqu'un photon est absorbé, il excite un électron de la chlorophylle, qui vient alimenter une réaction électrochimique : à partir d'eau et du dioxyde de carbone de l'air, la plante produit des glucides ainsi que de l'oxygène. Certaines cellules photovoltaïques, dites cellules de Graetzel – du nom de leur inventeur, le professeur Michael Graetzel de l'École polytechnique fédérale de Lausanne – s'inspirent d'ailleurs de la photosynthèse pour produire de l'électricité. À la différence des panneaux solaires classiques dans lesquels la lumière frappe directement un matériau semi-conducteur comme le silicium, le rayonnement est ici capturé par des molécules photosensibles. Celles-ci perdent alors un électron, récupéré pour créer un courant. Une technique bon marché qui permet de transformer environ 12% de l'énergie solaire en électricité.



Certaines cellules végétales savent elles aussi transformer l'énergie du Soleil ! En absorbant un photon, les pigments chlorophylliens (« billes » vertes), libèrent un électron. Un mécanisme imité pour certains panneaux solaires.

DR K. WHEELER/SPL/BIOSPHOTO

■ TOUT SAVOIR SUR L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE
dans les Repères pp. 39 à 41

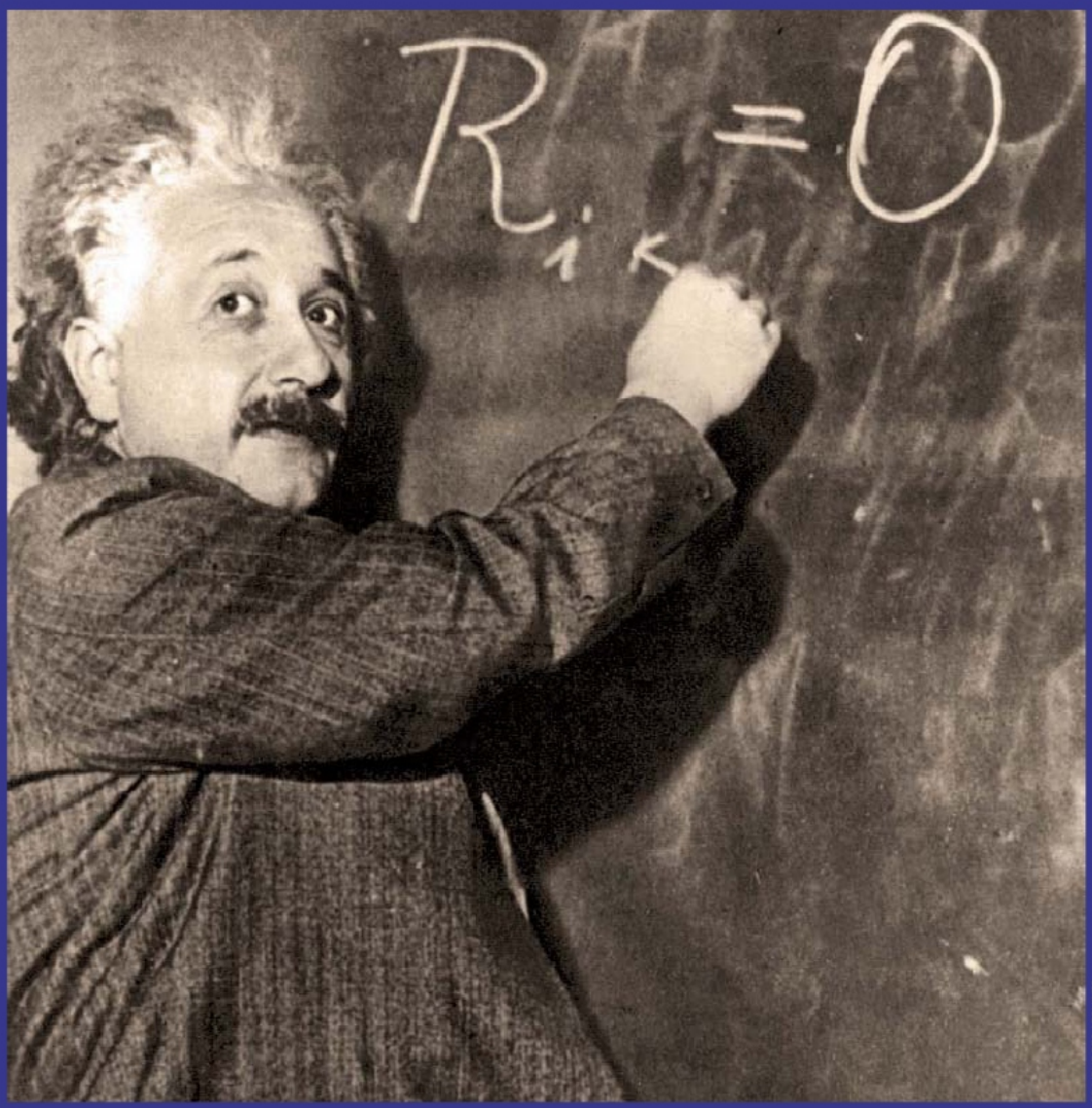
L'un des candidats les plus en vue pour « habiller » le silicium est la pérovskite, un cristal semi-conducteur. *« En seulement cinq ans, son rendement a été multiplié par quatre pour atteindre près de 19 %, du jamais vu ! »*, s'enthousiasme Daniel Lincot. Autre atout de ce matériau : sa synthèse est un jeu d'enfant. Préparé en solution à basse température, il peut être appliqué à l'aide d'un spray ou par impression, pour un coût modique. *« La fabrication de pérovskite pourrait être jusqu'à cinq fois moins chère que celle du silicium »*, prévoit Bernard Geffroy, qui travaille sur ce matériau au LPICM. Une fois levés certains obstacles – notamment son instabilité en présence d'humidité –, la pérovskite, en tandem avec le silicium, pourrait faire grimper le rendement jusqu'à 30 %. Les chercheurs envisagent la commercialisation de ce type de cellules photovoltaïques dès 2017, avec à la clé un coût de l'électricité solaire potentiellement divisé par deux. ■

« Cette source d'électricité renouvelable a maintenant les moyens de se tailler une vraie place dans notre mix énergétique »
Pere Roca i Cabarrocas, directeur du LPICM à Palaiseau

Grands témoins

EINSTEIN ET MOI

17 scientifiques évoquent l'influence du physicien sur leurs travaux. Extraits.

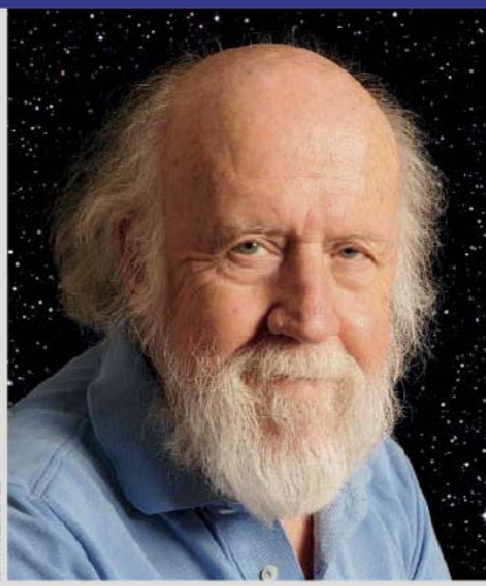


RDA/RUE DES ARCHIVES

Retrouvez les textes en intégralité sur notre site : **http://sciav.fr/HSeinstein**

Einstein n'arrivera pas à rejeter le hasard

À l'échelle atomique comme à l'échelle galactique, nous raconte Hubert Reeves, le comportement de l'Univers est plus simple qu'on le pensait avant Einstein, mais pas si simple que le pensait Einstein.



JOHN FOLEY/OPALE

Hubert Reeves

Astrophysicien

Deux idées-forces sont implantées chez Einstein avec une grande fermeté. La première est que le monde existe objectivement, comme "posé là", indépendamment de nos efforts pour le connaître. […] La seconde s'exprime par sa conviction que la réalité est totalement déterminée par les lois naturelles et que le hasard n'est qu'un alibi à notre ignorance. […] Il est convaincu que le futur est, en principe, prévisible par les lois de la physique. […] Ces deux certitudes auront sur ses recherches et leurs résultats une influence parfois bénéfique et parfois maléfique.

La théorie de la relativité générale, son chef-d'œuvre, s'énonce en peu de mots : la matière déforme l'espace ; cette déformation oriente les mouvements de la matière […]. Dans cette théorie, le hasard n'a nulle place. En conséquence, elle s'est avérée totalement incapable de s'adapter au monde des atomes. […] À l'idée classique que chaque cause a un seul effet, il fallait imposer l'existence de plusieurs effets différents, dont seule la probabilité relative était calculable. C'est par là que le hasard fait son entrée en physique. Jusqu'à sa mort, en 1955, Einstein tentera de le rejeter. Il n'y arrivera pas. […]

Sur le plan de la cosmologie, Einstein est convaincu que l'Univers, à grande échelle, est statique et stable. Aussi, quand ses équations semblent impliquer que la matière cosmique est en mouvement, il réagit fortement. Il cherche à annuler ce mouvement en remaniant ses équations. Il introduit dans son formalisme un nouveau terme appelé la "constante cosmologique". […] Peu après, les données obtenues par Edwin Hubble révèlent que l'Univers n'est pas stable. Les observations du mouvement ordonné des galaxies justifieront l'idée du Big Bang développée par Alexander Friedman et Georges Lemaître. […] Einstein aura beaucoup de difficulté à admettre la crédibilité du Big Bang. Il dira au chanoine Lemaître : "Vos équations sont bonnes, mais vos idées cosmologiques sont abominables", signifiant une fois de plus la radicalité de ses convictions. […] »

À LIRE

Hubert Reeves, *L'Univers expliqué à mes petits-enfants,* Seuil, 2011

Thibault Damour, *Si Einstein m'était conté,* Cherche-Midi, 2005

Alain Riazuelo, *in Le Ciel à découvert* (dir. Jean Audouze), CNRS Éditions, 2010

Un siècle plus tard, des idées et des applications nouvelles

Les résultats d'Einstein constituent encore le fondement de la physique actuelle, nous dit Thibault Damour. Ils sont indispensables pour sonder l'origine de l'espace et du temps ou tester la gravitation.

JOHN FOLEY/OPALE

[...] Mes recherches portent sur trois axes : le premier consiste à sonder l'origine de l'espace et du temps avant le Big Bang. Ce n'est possible qu'en partant du cadre de la relativité générale et en lui ajoutant la théorie quantique –qui décrit le monde microscopique –, dont Einstein fut aussi un des artisans. La question qui m'intéresse concerne en effet l'époque où la taille de l'Univers était de l'ordre de 10^{-35} mètre, cette fameuse longueur de Planck en deçà de laquelle nos lois physiques actuelles ne peuvent s'appliquer.

Le second aspect de mon travail porte sur le principe d'équivalence, autrement dit le fait que des objets différents tombent de la même manière dans un champ gravitationnel extérieur. [...]. Ce principe a été vérifié avec une précision de 10^{-12}, mais en 2016 l'expérience Microscope, à bord d'un satellite dédié, procédera à un test mille fois plus précis. Toute violation du principe d'équivalence serait le signe d'une nouvelle physique [...]. Enfin, je travaille sur les ondes gravitationnelles [...]. Einstein, qui les avait prédites, estimait qu'elles étaient trop faibles pour pouvoir être observées. Aujourd'hui, cela est devenu possible techniquement. [...] Un siècle plus tard, il est fascinant de constater que les résultats théoriques d'Einstein [...] génèrent encore des idées et des applications nouvelles. »

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI

Thibault Damour

Professeur à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES)

Dialogue des deux horizons

Pierre Binétruy imagine Einstein sur une plage, regardant l'horizon. La photo existe et elle prend pour lui, dont les recherches repoussent les limites du modèle standard de la physique, une résonance particulière.

« La notion d'horizon est familière aux peuples voyageurs [...]. L'horizon circonscrit l'espace. C'est une frontière qui sépare le connu de l'inconnu. Mais c'est aussi un concept temporel. Ne dit-on pas : "à l'horizon de dix ans" ? Car l'horizon est centré sur l'observateur et se déplace avec lui. [...] Il est intimement lié aux grandes découvertes, que l'on s'appelle Christophe Colomb ou Albert Einstein.

SANTA BARBARA HISTORICAL SOCIETY

Étant une notion spatio-temporelle, il devait être appelé à jouer tôt ou tard un rôle important dans la théorie de l'espace-temps qu'est la relativité générale. Il a en fait fallu attendre la seconde moitié du siècle pour qu'il devienne un concept central, en liaison d'abord avec la physique des trous noirs. L'horizon d'un trou noir est cette surface fictive qui isole la singularité de l'astre du reste de l'espace-temps [...] : une fois qu'elle est franchie, le retour est impossible et l'information est perdue. [...]

L'horizon peut aussi être cosmologique. Il replace alors l'observateur au centre de l'Univers, rejetant le Big Bang aux confins, à quatorze milliards d'années-lumière. [...] J'ai plus d'affinités avec cet univers-là qu'avec celui où l'on voit se dérouler le temps linéairement [...]. Dans mon travail, je trouve particulièrement enrichissant de faire dialoguer horizon de trou noir et horizon cosmologique. L'Univers nous est familier, le trou noir semble plus étrange. Nous sommes donc plus ouverts à l'invention de nouveaux concepts pour le trou noir, mais nous avons développé une meilleure intuition pour l'Univers lointain. [...] Dans une version moderne où l'Univers peut être vu comme une somme d'informations, l'horizon est peut-être la feuille sur laquelle se consigne cette information. [...] Et sur la photo que j'ai sous les yeux, Einstein n'est-il pas justement en train de déchiffrer sur l'horizon toute l'information contenue dans notre Univers ? »

PASCAL LAFAY/PICTURETANK

Pierre Binétruy

Directeur du PCCP (Paris Centre for Cosmological Physics), professeur à l'université Paris-Diderot

La relativité générale n'a jamais été réfutée par l'expérience

Décrire l'Univers comme un système physique, c'est d'abord avoir une idée de sa dynamique globale, dit Alain Riazuelo. Selon lui, la relativité générale a été la première à accomplir ce tour de force. Cent ans plus tard, elle est toujours aussi efficace.

XAVIER ROMEDER

Alain Riazuelo

Chargé de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris

« **Einstein n'aimait guère l'idée que l'Univers puisse être dynamique. [...] Serait-il heureux de savoir que des projets dédiés, comme le satellite Planck de l'Agence spatiale européenne (ESA), observent avec une précision croissante l'écho lumineux du Big Bang, et que celui-ci est même devenu le meilleur outil de détermination du contenu matériel de l'Univers ? Ce n'est pas sûr. Il serait, à l'inverse, peut-être plus heureux de savoir que la première prédiction qu'il a faite au sujet de sa théorie, à savoir la déflexion [modification de la trajectoire] de la lumière par les corps massifs, est observée de façon routinière dans quantité de circonstances, et qu'elle permet pêle-mêle une détermination directe du taux d'expansion de l'Univers, la détection de lunes autour de planètes extrasolaires ou, dans un futur proche, la détermination la plus précise du taux de croissance des grandes structures sous l'effet de la gravitation (projet Euclid, également de l'ESA).**

La relativité générale est-elle la bonne théorie de la gravitation ? Dans les régimes les plus extrêmes comme le cœur des trous noirs ou les premières phases du Big Bang, certainement non. Mais sinon ? Malgré des tests d'une précision croissante, elle n'a jamais été mise en défaut par l'expérience [...]. Et les théories concurrentes qui ont été envisagées [...] reposent toutes sur l'idée initialement développée par Einstein, à savoir que la gravitation est la manifestation d'une déformation de l'espace : la matière dit à l'espace comment se déformer et, en retour, l'espace dit à la matière comment se mouvoir en son sein. [...] Ce « principe d'équivalence » avait été qualifié par Einstein d'"idée la plus fructueuse de sa vie". [...] Le temps lui a donné raison. »

ÉRIC GARAULT/PASCO

Einstein m'accompagne depuis toujours !

Singularités, trous noirs, topologie cosmique... Pour Jean-Pierre Luminet, le cadre théorique développé par Einstein permet de penser le cosmos dans sa globalité.

Jean-Pierre Luminet

Directeur de recherche au CNRS, Observatoire de Paris et Laboratoire d'astrophysique de Marseille

« Einstein m'accompagne depuis toujours ! [...] L'ensemble de mes recherches [...] est fondé sur les prédictions de la relativité générale : le problème des singularités, l'astrophysique des trous noirs et la topologie cosmique. J'ai commencé à travailler sur l'astrophysique des trous noirs à la fin des années 1970. C'est autour de ces astres très denses que les prédictions de la relativité générale se manifestent le plus : l'espace-temps est extrêmement déformé, et une étoile passant à proximité subit les effets de marée du trou noir au point d'être déchiquetée. Les calculs ont montré que ce phénomène pouvait s'accompagner d'une détonation thermonucléaire avec émission de rayonnements énergétiques. De tels signaux ont été observés par les satellites [...].

Du point de vue de la relativité générale, le cœur d'un trou noir est une singularité : c'est ainsi que l'on désigne les points de l'espace-temps où certains paramètres physiques deviennent infinis. Il en va de même avec le Big Bang. Aujourd'hui encore, ces points nous sont inaccessibles. Il faut développer des extensions de la relativité générale [...] pour espérer éliminer ces singularités. Einstein nous a fourni un cadre théorique pour penser le cosmos dans sa globalité : selon la relativité générale, la courbure de l'Univers est déterminée par son contenu, donc par la matière et l'énergie qu'il contient. Mais certaines propriétés de l'espace dites topologiques, par exemple son caractère fini ou infini, échappent à la relativité générale. Or nos outils mathématiques ont beaucoup évolué, et nous sommes en mesure d'élaborer des topologies complexes, susceptibles de rendre compte des observations effectuées par les satellites [...]. Mais toutes restent compatibles avec les modèles de Big Bang issus de la relativité générale. Aujourd'hui encore, nous ne pouvons donc qu'être ébahis par la portée de l'œuvre d'Einstein. »

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI

À LIRE

Jean-Pierre Luminet, *Le Destin de l'Univers. Trous noirs et énergie sombre,* Fayard, 2006

Gabriel Chardin, *L'antimatière. La matière qui remonte le temps,* Le Pommier, 2010

Robert Mochkovitch et Roland Lehoucq, *Mais où est le Temple du soleil ? Enquête scientifique au pays de Tintin,* Flammation, 2003

Étienne Klein, *Discours sur l'origine de l'Univers,* Flammarion, 2012

Matière et énergie noires existent-elles réellement ?

Selon Gabriel Chardin, un siècle après la fin de la construction de la relativité générale, l'empreinte d'Einstein sur la physique contemporaine reste fondamentale.

Gabriel Chardin

Directeur adjoint scientifique de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

J.-F. DARS/CNRS PHOTOTHÈQUE

« L'empreinte d'Einstein se retrouve [notamment] dans la question de l'énergie noire de l'Univers [...]. Cette mystérieuse composante répulsive mobilise les efforts d'une communauté dépassant maintenant le millier de physiciens et d'astrophysiciens. Nos équipes du CNRS se sont impliquées dans deux grands projets, le satellite Euclid et le grand télescope LSST, qui devraient considérablement faire avancer, à partir de 2020 environ, la question de la matière noire et de l'énergie noire, composants principaux de l'Univers selon le modèle standard. [Et] vérifier si l'énergie noire se comporte comme la constante cosmologique qu'Einstein avait proposée, avant de l'abandonner comme "la plus grande erreur de sa vie" ! [...]

Personnellement, après avoir cherché longtemps la matière noire, j'ai été depuis 2006 l'avocat d'une thèse hétérodoxe consistant à expliquer matière noire et énergie noire, qui n'existeraient pas réellement, par un univers gravitationnellement vide à grande distance, que nous avons appelé l'univers de Dirac-Milne. Dans cet univers, la masse positive des particules de matière serait compensée à longue distance par l'antimatière, dont les antiparticules présenteraient une masse négative. La situation est très analogue aux électrons et aux trous présents dans un semi-conducteur. Très différent de l'univers cosmologique standard dans ses premiers instants, un tel univers présenterait avec le nôtre de nombreux éléments communs (âge, composition nucléaire, diagramme luminosité-distance des supernovae...). Au Cern, les expériences Alpha, Aegis et surtout Gbar, qui visent à mesurer la masse gravitationnelle de l'antihydrogène, pourraient nous apporter d'ici quelques années de nouveaux éléments permettant de mieux comprendre la forme de la relativité générale d'Einstein, toujours étonnamment actuelle. »

JEAN MOLETTE/AP/CNRS/UPMC

Robert Mochkovitch
Chargé de recherche au CNRS, Institut d'astrophysique de Paris

Coups de théâtre dans le ciel

La relativité, restreinte et générale, est au cœur des modèles décrivant les sursauts gamma, sources les plus brillantes de l'Univers.

Quand Einstein meurt en 1955, aucun sursaut gamma n'a encore été observé. C'est l'époque du développement rapide des programmes nucléaires américain et soviétique. [...] De nombreux essais dans l'atmosphère sont réalisés. Un traité visant à les interdire est signé en 1963 [...] par les Soviétiques, les Américains et les Britanniques. Désireux de vérifier qu'il est bien respecté, les Américains conçoivent [...] une série de satellites capables de détecter depuis l'espace le flash gamma produit par une arme explosant dans l'atmosphère.
Si les Vela n'enregistrèrent aucune explosion soviétique, ils observèrent pour la première fois un sursaut gamma le 2 juillet 1967. D'autres suivirent, mais la découverte ne fut annoncée qu'en 1973. Plusieurs satellites étudièrent alors les sursauts, mais un paramètre capital, leur distance, restait inconnu. Comme ils étaient observés uniquement dans le domaine gamma, où les boîtes d'erreur sur la position des sources sont grandes, ils ne pouvaient être associés à aucune contrepartie dans d'autres domaines de longueur d'onde (en particulier optique). [...]
Un premier coup de théâtre se produisit au début des années 1990, quand l'expérience Batse (Burst and Transient Source Experiment), à bord du satellite Compton Gamma-Ray Observatory, montra que la distribution des sursauts sur le ciel était isotrope. Beaucoup plus sensible que toutes les expériences qui l'avaient précédée, Batse détectait un sursaut par jour. On s'attendait à ce que la distribution des sursauts sur le ciel traduise leur appartenance à la Galaxie [...]. La distribution isotrope [...] en suggérait une autre, bien plus fascinante, où les sursauts seraient placés à distance cosmologique. Cela fut confirmé [...] en 1997 grâce au satellite Beppo-Sax [qui] pouvait fournir en quelques heures des boîtes d'erreur à la minute d'arc. La recherche de contreparties dans le domaine optique devenait possible, et la première fut en effet découverte en février 1997. Le 5 mai fut observée la seconde, dont un spectre put être obtenu grâce au télescope géant Keck. Celui-ci montra des raies d'absorption produites par des nuages se trouvant sur la ligne de visée entre le sursaut et nous. Ces raies étaient fortement décalées vers le rouge (jusqu'à un redshift z = 0,847), confirmant la distance cosmologique des sursauts. [...] Ces distances extrêmes ont fondamentalement changé le statut des sursauts gamma. Ils sont d'un seul coup devenus les sources les plus brillantes de l'Univers, et la relativité s'est imposée comme un ingrédient fondamental de leur description. »

Un sacré bricoleur

Einstein demeure pour Étienne Klein l'homme dont les travaux ont révolutionné la physique. Mais aussi un ingénieur attentif et scrupuleux... un sacré bricoleur!

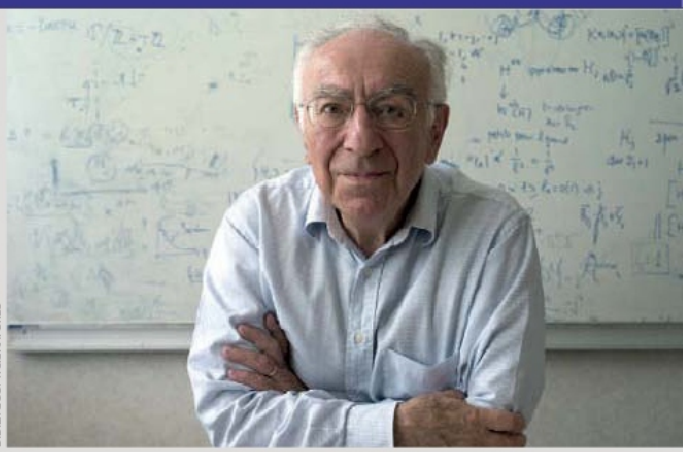
Un cliché tenace veut que les physiciens théoriciens soient des êtres contemplatifs, rêveurs, en marge, déconnectés de la réalité et gravement dépourvus de sens pratique. On imagine qu'ils discernent dans la matière toutes sortes d'objets invisibles mais peinent à reconnaître leur voisine de palier. Que ce sont des êtres improbables ayant volontiers « la tête ailleurs », à l'instar de Louis XVI au sortir de la guillotine, et qu'ils sont incapables de se préoccuper de choses bassement matérielles.
[...] Le meilleur contre-exemple à cette caricature est Einstein soi-même, qui a déposé de nombreux brevets en bonne et due forme. Par exemple, en 1908, à Berne, il collabore étroitement avec Paul Habicht à la réalisation d'un voltmètre capable de mesurer avec précision de très faibles tensions, de l'ordre du dix-millième de volt. L'appareil, baptisé « multiplicateur de potentiel Einstein-Habicht », fera l'objet de deux publications et sera commercialisé à partir de 1912.
Cinq ans plus tard, en 1917, alors qu'il vient de mettre un point final à une nouvelle théorie de la gravitation, Einstein conçoit un profil d'aile d'avion censé assurer une portance maximale pour une traînée minimale. Un prototype est réalisé dans un hangar de l'aérodrome d'Aldershof, qu'on fixe au fuselage d'un biplan, mais les essais ne sont guère concluants. Comment Einstein remerciera-t-il les ingénieurs qui ont construit ce prototype ? En leur faisant une conférence sur la relativité, pardi ! [...] »

ALLARD-LELIEVRE/AFP/CNRS

Étienne Klein
Professeur à l'École centrale de Paris, directeur du Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière au CEA

Une formule moins rebattue que E = mc²

Pour Roger Balian, les lumineux écrits d'Einstein restent une source d'inspiration, notamment dans son domaine de prédilection, la physique statistique.



DIDIER GOUPY/SIGNATURES

Roger Balian
Conseiller scientifique au Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

Une bonne partie de mon activité a été consacrée à la physique statistique, qui vise à expliquer les propriétés de la matière à notre échelle de manière unifiée en partant des principes microscopiques fondamentaux. Einstein a joué un rôle majeur dans l'élaboration de cette nouvelle science, devenue outil de base du théoricien, puisque ses cinq articles sur le mouvement brownien (1905-1908) ont servi de charnière entre la théorie cinétique des gaz et la mécanique statistique moderne. Une importante "relation d'Einstein" – moins rebattue que la formule E = mc² ! – figure dans la plupart des cours sur ce domaine (dont le mien). Elle exprime que le coefficient macroscopique de diffusion, pour des particules se propageant dans un milieu, est proportionnel à leur mobilité microscopique, ce qui détermine en particulier la conductivité d'un semi-conducteur. [...]

Einstein a [aussi] été l'initiateur de la mécanique quantique, en attribuant à la lumière une double nature d'onde et de corpuscules [...]. Comme la majorité de mes collègues, je travaille dans le cadre de la physique quantique issue de ces idées [...]. Avec Claude Itzykson et Jean-Michel Drouffe, nous avons, par exemple, étudié les champs de jauge sur réseau ; dans ce sujet, outil aidant à rendre compte des interactions fondamentales entre particules élémentaires, la mécanique quantique s'allie au concept de transformation de jauge, où l'on retrouve une autre facette de l'œuvre d'Einstein. Depuis plusieurs années, nous nous sommes aussi intéressés avec Armen Allahverdyan et Theo Nieuwenhuizen au problème de la mesure quantique. [...] Cette question a toujours préoccupé Einstein, non seulement en tant que telle mais aussi pour ses implications philosophiques, comme en témoignent ses débats célèbres avec Niels Bohr. Contrairement à ses souhaits, il faut probablement se résigner à admettre que les énoncés de notre théorie la plus fondamentale, la mécanique quantique, ne portent pas directement sur le réel, mais seulement sur ce que nous sommes capables d'en dire. »

À LIRE

Roger Balian, Françoise Balibar, Hervé Barreau, Bernard Piettre, *Le Temps et ses représentations,* L'Harmattan, 2003

Claude Cohen-Tannoudji, Franck Laloë, Bernard Diu, *Mécanique quantique,* Hermann, 2007

Sébastien Balibar, *La Pomme et l'atome,* Odile Jacob, 2005

Nicolas Gisin, *L'Impensable Hasard,* Odile Jacob, 2012

Michel Spiro et Gilles Cohen-Tannoudji, *Le Boson et le chapeau mexicain,* Folio, 2013

À la base du fonctionnement des lasers

Selon le prix Nobel 1997 Claude Cohen-Tannoudji, les théories d'Einstein jouent un rôle essentiel dans la plupart des développements importants concernant les photons et les atomes, avec notamment des applications dans le domaine des lasers.

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

Claude Cohen-Tannoudji
Prix Nobel 1997, spécialiste de physique atomique

Dans son célèbre article de 1905 sur les quanta de lumière, Einstein introduit le concept de photon, qui est à la base de toutes les interactions matière-rayonnement. Par exemple, le pompage optique et le refroidissement laser, deux domaines dans lesquels j'ai travaillé, sont fondés sur les échanges de moment cinétique et de quantité de mouvement entre atomes et photons.

L'émission stimulée, introduite par Einstein en 1916 [...], est [quant à elle] à la base du fonctionnement des lasers. Ces sources de lumière, aux propriétés exceptionnelles, ont [...] renouvelé [des] disciplines scientifiques comme la physique atomique et l'optique et donné naissance à une moisson très riche d'applications. [...] [Enfin], la condensation d'un gaz d'atomes dans un état quantique unique, prévue par Einstein à la suite des travaux de Bose sur la statistique de particules indiscernables, a été observée en 1995 sur des gaz d'atomes alcalins refroidis par laser. Ces gaz quantiques sont de nouveaux états de la matière, ayant des propriétés macroscopiques quantiques originales comme la cohérence et la superfluidité. Ils sont l'objet d'une multitude de travaux expérimentaux et théoriques et permettent des rapprochements fructueux entre physique atomique et physique de la matière condensée. [...] »

Un délicieux sentiment

« J'ai rencontré Einstein », dit Sébastien Balibar. Pas lui-même, bien sûr, mais ses travaux. Dont celui qui lui valut le prix Nobel en 1921 !

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

Sébastien Balibar

Directeur de recherche au Laboratoire de physique statistique de l'École normale supérieure, Paris

La théorie d'Einstein de l'effet photoélectrique prouve rien de moins que la quantification de la lumière sous forme de grains élémentaires, les photons. Einstein a prédit qu'en éclairant une surface métallique, on devait éjecter des électrons dont l'énergie maximale était la différence entre l'énergie des photons et l'énergie de liaison des électrons au métal. […]

Soixante-dix ans plus tard, j'ai croisé ce travail par hasard. J'étudiais comment des impulsions de chaleur se propageaient dans un liquide quantique, l'hélium superfluide. Je me suis aperçu qu'en arrivant à la surface libre du liquide, ces impulsions évaporaient des bouffées d'atomes. J'ai mesuré leur vitesse maximale et trouvé 79m/s, la vitesse d'un TGV. Je me suis aperçu alors qu'en 1969, Phil Anderson (prix Nobel 1977 pour d'autres travaux) avait compris la relation entre l'effet photoélectrique et l'évaporation quantique. Elle provient du fait que, dans l'hélium superfluide à suffisamment basse température, la chaleur est quantifiée et que parmi ce qu'on peut appeler des "grains de chaleur" se trouvent des vibrations élémentaires particulières, les "rotons" de Landau (encore un prix Nobel, cette fois en 1962). En somme […], j'avais trouvé une manifestation directe de la quantification de la chaleur dans l'hélium superfluide et de l'existence des rotons. J'ai eu le délicieux sentiment d'avoir mis, par hasard, un orteil dans la cour des grands. [...] »

Nous utilisons au quotidien l'étrangeté quantique

En cherchant à réfuter la physique quantique, Einstein a imaginé des expériences de pensée qui nourrissent encore les débats sur le monde subatomique.

KEYSTONE

Nicolas Gisin

Professeur à l'université de Genève

Je n'utilise pas directement les travaux d'Einstein, mais les débats nés de ses réflexions. Car, d'une certaine manière, ce sont ses critiques et les expériences de pensée qu'il avait imaginées pour prendre la physique quantique en défaut qui ont fait avancer les idées dans le domaine de l'optique quantique.

Au Laboratoire de physique appliquée à Genève, avec mes collaborateurs, nous utilisons des particules intriquées pour le codage de l'information. L'intrication quantique [...] n'existe que dans le monde subatomique : deux particules ayant interagi à un moment de leur existence sont intriquées à vie. Même si on les éloigne l'une de l'autre d'un milliard d'années-lumière, une mesure effectuée sur l'une permettra de déduire l'état de l'autre. [...] Mais, avant 1982, ce principe était encore bien flou et les particules étaient considérées comme des objets indépendants [...]. En 1935, Einstein, voulant démontrer à tout prix que la physique quantique était incomplète, concocta avec deux de ses amis une expérience de pensée qui porte leur nom : le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen, couramment nommé EPR. Il imaginait une explication à ce principe de « non-séparabilité » qu'il ne parvenait pas à admettre. Selon lui, les deux particules [...] devaient nécessairement échanger de l'information [...]. Le paradoxe EPR est resté à l'état d'énigme jusqu'à ce que les expériences d'Alain Aspect, aujourd'hui à l'Institut d'optique à Orsay, lui donnent tort. La physique quantique est bien étrange, et c'est cette étrangeté que nous utilisons au quotidien. »

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI

Notre espoir : qu'une naine brune traverse notre ligne de visée

Certains astres peuvent amplifier la lumière d'autres étoiles, a révélé Einstein. Michel Spiro espérait que ce phénomène permettrait de repérer la mystérieuse matière noire de l'Univers.

B. CHAROY/PASCO

Michel Spiro

Ex-président du conseil du Cern, il a dirigé l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS

L'un des aspects de mon travail s'appuie directement sur l'œuvre d'Einstein. Il s'agit du programme de recherche de matière noire Eros, qui a débuté en 1990 et s'est achevé au tout début des années 2000. Notre hypothèse était qu'une partie de la matière noire de l'Univers pouvait exister sous forme d'objets sombres dans les halos des galaxies, comme les naines brunes. Pour détecter ces astres invisibles, nous avons utilisé un phénomène prédit par la relativité générale, celui des lentilles gravitationnelles : en visant les étoiles lointaines, nous espérions qu'une naine brune traverse la ligne de visée et, pendant un temps assez court, amplifie la lumière de l'étoile. La naine jouerait alors le rôle de lentille, déviant la lumière et amplifiant l'éclat de l'étoile. Ce programme poursuivi pendant une dizaine d'années n'a pas révélé de naine brune dans le halo de notre galaxie… De ce fait, aujourd'hui, la recherche de matière noire s'est orientée vers les particules exotiques. »

PROPOS RECUEILLIS PAR A. KH.

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

Pierre Fayet
Directeur de recherche au CNRS, professeur à l'École polytechnique, Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure

N'y aurait-il pas aussi d'autres particules, d'autres forces ?

La gravitation, décrite par la relativité générale d'Einstein, ne semble pas pouvoir se couler dans le cadre quantique. Selon Pierre Fayet, une nouvelle théorie permettrait de répondre à des questions irrésolues : la supersymétrie.

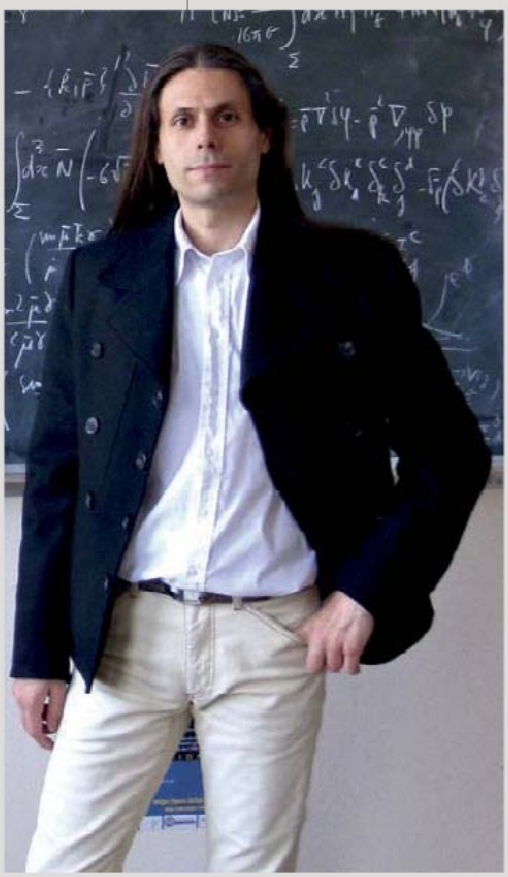
« La nature de la matière et de l'énergie sombres qui paraissent régir l'évolution de l'Univers et son expansion accélérée reste inconnue, de même que l'origine de la prééminence de la matière sur l'antimatière. N'y aurait-il pas aussi de nouvelles sortes de particules, de nouvelles forces, et même peut-être, au-delà de l'espace et du temps, des dimensions cachées, minuscules, se mesurant en milliardièmes de milliardième de centimètre, voire bien plus étranges encore ?
La supersymétrie propose d'élargir les notions d'espace et de temps, déjà reliées par la théorie de la relativité, à une nouvelle géométrie, celle du superespace. Celui-ci possède des coordonnées supplémentaires quantiques associées aux rotations, dont le carré est égal à zéro. Les transformations de supersymétrie agissant dans le superespace sont aussi à la source des translations, dans l'espace comme dans le temps, nécessitant la présence de la relativité générale, et donc de la force de gravitation. Ces transformations agissent sur chaque particule en changeant son moment cinétique de rotation, ou spin, d'une demi-unité [...].
Ceci m'a conduit dans les années 1970 au "modèle standard supersymétrique", qui associe à chaque particule une particule image encore inconnue, en quelque sorte son reflet par supersymétrie [...]. D'où toute une famille de nouvelles particules dont les plus légères, probablement des neutralinos ayant survécu aux annihilations des premiers instants de l'Univers, pourraient constituer la mystérieuse matière sombre. Il devrait aussi exister d'autres bosons de Brout-Englert-Higgs, neutres et chargés. La recherche de toutes ces particules est l'un des buts majeurs du collisionneur LHC au Cern, dont l'énergie devrait bientôt passer de 8 à 13 TeV (téraélectronvolts) [...]. »

À LIRE

Aurélien Barrau, *Des univers multiples. À l'aube d'une nouvelle cosmologie,* Dunod, 2014

Michel Cassé, *Du vide et de l'éternité,* Odile Jacob, 2014

Marc Lachièze-Rey, *Voyager dans le temps. La physique moderne et la temporalité,* Seuil, 2013



COURTESY AURÉLIEN BARRAU

La cohérence et l'élégance de l'Univers

Pour Aurélien Barrau, spécialiste notamment des trous noirs, la théorie de la relativité générale est cruciale, un socle sur lequel tout repose, mais qu'en même temps les scientifiques tentent de dépasser et d'améliorer.

« **Les trous noirs et l'Univers sont évidemment des systèmes qui avaient été étudiés avant l'avènement de la relativité générale. Mais c'est véritablement cette dernière qui leur a conféré la cohérence et l'élégance que nous leur connaissons aujourd'hui. Le Big Bang, par exemple, est impossible à comprendre sans la théorie einsteinienne. Pensé dans le cadre de la gravitation universelle, il devrait avoir eu lieu "quelque part", comme une explosion dans l'espace. Seule la relativité permet de comprendre qu'il a eu lieu "partout en même temps", et que l'expansion de l'Univers n'est pas un mouvement des objets dans l'espace, mais une dilatation de l'espace lui-même.**
L'ensemble de l'édifice d'Einstein est remarquablement cohérent et efficace. Mais il a aussi ses limites. En particulier, il n'intègre pas les leçons de la physique quantique. Or, au centre des trous noirs ou au voisinage du Big Bang, tout laisse penser que ces effets quantiques sont importants. C'est la raison pour laquelle je travaille, avec beaucoup d'autres, sur des modèles de gravitation quantique. Ces derniers ne stipulent pas que la théorie d'Einstein est *fausse* mais qu'elle est *incomplète*. Il ne s'agit pas de la remplacer par un meilleur modèle, mais de tirer parti des leçons de la relativité pour l'étendre en incluant les effets quantiques. »

Aurélien Barrau
Professeur à l'université Joseph-Fourier, Grenoble, chercheur au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie

Le rêve brisé et raccommodé d'Einstein

Nous vivons, dit Michel Cassé, des temps fleuris, d'extension des notions de matière, d'espace-temps et d'univers, mais aussi d'unification. Les quatre forces de la nature n'en feraient qu'une. Ce qui ressuscite le vieux rêve de l'humanité, incarnée par Einstein : tout voir en un.

MICHEL SABAH

Michel Cassé

Directeur de recherche au CNRS, professeur à l'École polytechnique, Laboratoire de physique théorique de l'École normale supérieure

« La matière telle que vous la conceviez, Démocrite, Newton et vous, cher maître, n'est que l'écume de la matière, elle ne constitue qu'une partie congrue de l'Univers (4 à 5 % de sa masse). Et encore ! Les particules ne sont que des métaphores. Les entités quantiques, champs et particules, sont indescriptibles dans votre langue, classique, trop peut-être. […] Mais vous restez en proue. Tous derrière et vous devant. Disparu, évanoui dans l'azur ou le noir des trous, vous êtes encore à la fine pointe de la recherche. Votre rêve d'unification des forces de la physique […] constitue aujourd'hui le programme majeur des cordeliers, adeptes de la théorie des supercordes, et des branaires, suppôts de la théorie des branes, pour lesquels notre bas monde, bas en nombre de dimensions s'entend, flotterait comme un drapeau dans le vent d'une cinquième, sixième… dixième dimension d'espace. […] Le XXe siècle, le vôtre, sans conteste, cher cousin, a vu triompher l'équivalence de l'énergie et de la masse dans les étoiles et les bombes ($E = mc^2$), votre cosmologie […] et votre esprit unitaire. Vous avez voulu géométriser à toute force les forces graviationnelle et électromagnétique [...]. Mais les quantiques ont détruit votre rêve en poussière.

Et voici qu'ils s'annexent votre gravité chérie. Probablement contre votre gré (on sait en quelle suspicion vous tenez les joueurs de dés), la gravitation jusque-là rebelle rend les armes et rejoint, la traîtresse, les rangs des forces quantiques coalisées. De rusés théoriciens soutiennent qu'une particule appelée " graviton" est associée à la gravité […] . Ils estiment que l'espace comporte 9 voire 10 dimensions, dont toutes sauf trois seraient enroulées sur elles-mêmes, formant en chaque point de notre espace de tout petits cerceaux ou des boucles d'oreilles. Si les gravitons et les extradimensions existent, il serait possible de les créer au LHC, mais ils disparaîtraient tout de suite dans les extra-dimensions. […]

Rien au LHC et rien dans le ciel […]. Ou bien les extra-dimensions (comme les extraterrestres) sont une fable, ou bien elles sont trop petites pour être détectées avec nos moyens actuels. Bref, il y a du grain à moudre pour des générations de meuniers cosmiques et perspective de traque exaltante pour les fouineurs de tout petits terriers, physiciens des particules élementaires, qui en fait ne le sont pas. »

Deux piliers de notre physique, véritables corpus de pensée

Aujourd'hui encore, les théories d'Albert Einstein sont au centre des discussions scientifiques, explique Marc Lachièze-Rey.

« Albert Einstein est avant tout l'inventeur des théories de la relativité et l'initiateur de la physique quantique […], deux piliers de notre physique [qui] constituent de véritables corpus de pensée […], remettant en cause nos notions les plus fondamentales : nature et réalité du temps, de l'espace (ou de l'espace-temps), causalité, cosmologie, constitution de la matière et des objets physiques… Elles suscitent de nombreuses questions qui occupent aujourd'hui les physiciens.

Une grande part d'entre elles fut initialement formulée par Einstein […] et les positions qu'il a adoptées […] servent toujours de référence en ce XXIe siècle, défendues ou au contraire attaquées par les uns ou les autres.

[…] Les liens entre quantique et relativiste échappent à notre compréhension. Le souci d'harmonisation entre les deux était dès les années 1930 une préoccupation majeure d'Einstein, rejoignant la quête d'une théorie unitaire [...], même si l'unification des interactions ne concernait à l'époque que la gravitation et l'électromagnétisme. Ce sont bien là les questions qui occupent le théâtre de la physique fondamentale contemporaine, qui suit ainsi en grande partie le programme énoncé par Einstein […].

Une des idées à l'origine de la physique quantique était d'envisager la lumière [...] sous forme de « petits paquets » (aujourd'hui nommés photons). Einstein avait suggéré plus tard que la géométrie de l'espace-temps elle-même puisse être non plus continue, mais discrète. Si, à l'époque, les outils mathématiques manquaient pour un tel programme, la plupart des approches actuelles obéissent […] à cette injonction. Dernier exemple, le domaine de la gravité quantique ne peut éviter de se référer constamment à Einstein. En simplifiant, on cherche à quantifier sa théorie de gravitation, la relativité générale. Mais celle-ci déclare que le temps n'existe pas alors que la quantification […] en a besoin. Einstein exprima clairement cette inexistence fondamentale […]. »

Marc Lachièze-Rey

Directeur de recherche au CNRS, laboratoire Astroparticule et Cosmologie, université Paris Diderot

PIERRE MARAVAL

SPL/COSMOS

Des trous de ver dans la toile

Peu de films ont osé emprunter ces raccourcis de l'espace-temps. Le dernier en date, *Interstellar,* divise.

L'hypothèse des trous de ver, émise par Albert Einstein et Nathan Rosen en 1935, aurait pu ouvrir d'excitantes perspectives scénaristiques. Car ces raccourcis radicaux à travers l'espace offrent l'avantage de contourner l'insoluble problème de la lenteur des engins spatiaux. Pourtant, si l'on oublie le médiocre *Donnie Darko* (Richard Kelly, 2001), les hypothétiques objets célestes ont été bien peu traités au cinéma. On reste toutefois séduit par *Contact* (Robert Zemeckis, 1997), encore troublant aujourd'hui : le programme de recherche d'intelligence extra-terrestre (Seti) capte un bruissement sourd surgi de l'espace ; il s'agit en fait d'un signal contenant les plans d'une machine qui permettra au Dr Arroway (Jodie Foster) de se glisser dans un trou de ver. Entre onirisme pur et trouble psychiatrique, un stupéfiant voyage façon *2001* vers le grand lointain. Tout récemment, c'est *Interstellar*, qui a suscité le débat. Certains scientifiques, tel l'astrophysicien Alain Riazuelo, pensent que les trous de ver, s'ils existent, sont trop instables pour y faire passer un engin spatial. D'autres, comme son confrère Kip Thorne, conseiller du film, estiment au contraire que l'aspect scientifique d'*Interstellar* est satisfaisant. Si l'on ne peut que se réjouir du retour de la *hard science* (l'anticipation basée sur de véritables éléments scientifiques) après des années de SF « gadget », on s'interroge sur la dimension cinématographique du film de Christopher Nolan. Derrière *2001*, *Blade Runner* ou *Contact*, il y avait des auteurs majeurs (Arthur C. Clarke, Philip K. Dick et Carl Sagan). L'interminable *Interstellar* a été écrit, lui, par un réalisateur. La dimension esthétique du film de Christopher Nolan est pourtant mineure : aucune vision plastique ni graphique. D'ailleurs, pour simuler ce nouveau monde à l'autre bout du trou de ver, il n'a trouvé d'autre site de tournage que celui déjà exploité par Ridley Scott dans *Prometheus*. On est ravi qu'Hollywood ait découvert l'Islande...

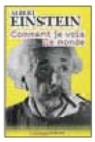
PAGE RÉALISÉE PAR YVES BLANC ET AZAR KHALATBARI

LES ESSENTIELS

Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité

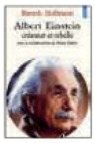
Comment l'espace a-t-il été pensé avant Einstein ? Françoise Balibar analyse ici, pour des lecteurs avertis, l'apport du physicien en interrogeant les travaux de ses prédecesseurs. Par le même auteur, mais pour tout public: *Einstein, la joie de la pensée,* Découvertes Gallimard. **Françoise Balibar, Puf, 2007, 136 pages, 13 €**

Comment je vois le monde



Les écrits d'Einstein, sur la relativité générale, mais aussi la religion, la politique, la bombe, les Juifs, l'État d'Israël, compilés dans ce petit livre qui se lit comme un roman. **Albert Einstein, Flammarion, 2009, 192 pages, 7,20 €**

Albert Einstein, créateur et rebelle



La biographie officielle, racontée par un physicien britannique qui fut le collaborateur d'Einstein à Princeton. Un ouvrage de référence. **Banesh Hoffmann, Points Seuil, 1979, 300 pages**

Einstein et la relativité générale

Le milieu scientifique n'a pas adopté d'emblée la relativité générale. Le physicien Jean Eisenstaedt raconte ici avec brio les épreuves et observations qui ont conforté la théorie. **Jean Eisenstaedt, CNRS Éditions, 2013, 581 pages, 12 €**

Einstein, la vie d'un génie

Documents, lettres, photos : les fac-similés rassemblés dans cet ouvrage rendent vivant le personnage. Les coupures de presse racontent l'atmosphère de cette première moitié du XX[e] siècle dans laquelle Einstein a évolué. Un bel objet. **Walter Isaacson, Guy Trédaniel, 2013, 95 pages, 19,90 €**

Les croisières du **SAVOIR** SCIENCES ET AVENIR

CE QUE SAVAIENT LES CIVILISATIONS DISPARUES

Embarquer à bord d'une Croisière du Savoir, c'est goûter à la fois au plaisir du voyage et à celui de la découverte - en compagnie de grands scientifiques venus partager avec nous leur amour de la connaissance. En juin 2015, «Ce que savaient les civilisations disparues», de Sumer aux Mayas en passant par l'Egypte, nous fera redécouvrir le génie de l'homme au cours des temps - parfois oublié, mais dont nous sommes aussi les héritiers !

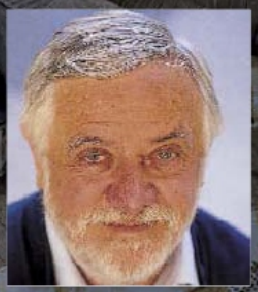
Les escales de cette croisière, de Venise à Istanbul en passant par Athènes, nous font à elles seules rêver. Que ce soit la tombe royale de Philippe II, père d'Alexandre le Grand, à Vergina, ou la vieille ville qui vit naître Dioclétien – oui, vous aviez sans doute deviné qu'il s'agit de Split – , ou enfin la Sublime Porte, Istanbul ! Surtout, chers amis de *Sciences et Avenir,* déjà ou futurs « croisiéristes du savoir », toutes sont emblématiques de civilisations qui nous ont légué de précieux trésors de connaissances dont nous avons su faire prospérer certaines… Mais combien d'autres avons-nous oubliées ? Avant, parfois, de les redécouvrir ! Précisément, « ce que savaient les civilisations disparues » sera le thème des conférences auxquelles vous assisterez pendant notre périple, un thème qui stimule notre imaginaire : de quoi rêver yeux et oreilles grands ouverts au cours de notre navigation.

Comme à chaque Croisière du savoir, la sixième (déjà) en cette année 2015, Yves Coppens, professeur au Collège de France, expert et admirateur de la formidable inventivité humaine qui s'est manifestée au cours des millions d'années dont nous sommes le produit, a réuni pour nous un plateau prestigieux. Nous lèverons les yeux vers le ciel et, avec Marc Lachièze-Rey, y décrypterons ce que les Anciens y ont vu, des millénaires avant nous. Nous découvrirons les nouveaux savoirs qui en ont jailli ! Car c'est bien là le génie humain que d'avoir su, comme nous le racontera Jean-Paul Demoule, créer, partout et toujours, à partir de l'observation de la nature, du ciel et des autres humains. Comme le dit le philosophe Michel Blay, qui voguera avec nous, *« nous avons du mal à imaginer qu'il y a des milliers d'années, des hommes savaient déjà effectuer des calculs sophistiqués »* ; mais aussi développer des pharmacopées efficaces ou des architectures complexes… Cette mémoire humaine est source d'étonnements extraordinaires. Venez la partager avec nous, en toute simplicité, chaleur et convivialité !

Dominique LEGLU
Directrice de la rédaction
de *Sciences et Avenir*

AVEC VOUS À BORD DU NÉO CLASSICA

CES PERSONNALITÉS PRESTIGIEUSES PENDANT TOUTE LA DURÉE DE LA CROISIÈRE



YVES COPPENS
• Paléontologue, académicien et professeur au Collège de France. Dernier ouvrage paru : « Pré-ludes ».

MICHEL BLAY
• Historien et philosophe des sciences, président du Comité pour l'histoire du CNRS. Dernier ouvrage paru : « L'existence au risque de l'innovation ».

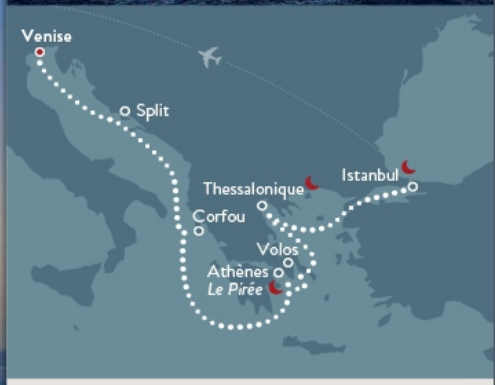
JEAN-PAUL DEMOULE
• Archéologue et historien, professeur à l'université Paris 1-Panthéon-Sorbonne. Dernier ouvrage paru : « Mais où sont passés les Indo-Européens ? Le mythe d'origine de l'Occident ».

MARC LACHIÈZE-REY
• Astrophysicien théoricien, cosmologiste au laboratoire Astroparticule et cosmologie (CEA, CNRS, université Paris-Diderot, Observatoire de Paris). Dernier ouvrage paru : « Voyager dans le temps. La physique moderne et la temporalité ».

11 JOURS / 10 NUITS

Du 17 au 27 juin 2015

DE VENISE À ISTANBUL
A BORD DU Néo Classica !



Jour	ESCALE	Arrivée	Départ
1	✈ Venise		18h00
2	Split	09h00	17h00
3	Corfou	14h00	20h00
4	En mer	-	-
5	Le Pirée/Athènes	07h00	14h00
6	Le Pirée/Athènes		14h00
7	Volos	08h00	19h00
8	Thessalonique	08h00	24h00
9	En mer	-	-
10	Istanbul	07h00	-
11	Istanbul ✈	-	Selon vols

5 % DE RÉDUCTION pour toute inscription avant le 31/01/2015

1890 € par personne en cabine intérieure occupée par 2 personnes.

Ce prix comprend :

- les transports aériens :
  - Paris, Lyon ou Nice ✈ Venise
  - Istanbul ✈ Paris, Lyon ou Nice
- Les transferts entre l'aéroport et le bateau
- La croisière en pension complète, boissons aux repas incluses
- Toute l'animation à bord et les conférences exclusivement réservées aux lecteurs de Sciences et Avenir
- La présence (sauf raison de force majeure) pendant toute la croisière des conférenciers invités par Sciences et Avenir

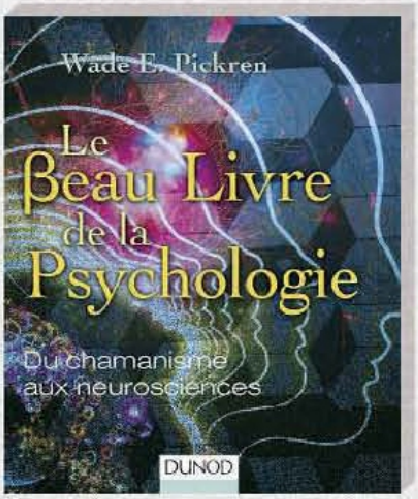
RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : BLEU VOYAGES SÉLECTOUR «CROISIÈRE DU SAVOIR»
LES JARDINS D'ENTREPRISE BÂT. B2 213 RUE DE GERLAND 69007 LYON
voyages-du-club@bleu-voyages.fr Tél. 04 72 76 75 66

Selectour Afat Bleu Voyages

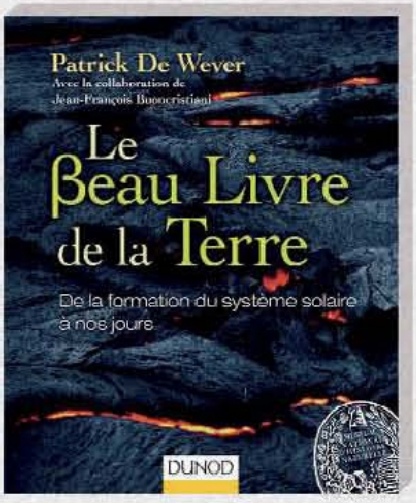
Les Beaux Livres du Savoir

En vous plongeant dans ces livres magnifiquement illustrés, voyagez à travers les siècles à la rencontre des hommes, des idées et des découvertes qui font avancer le monde.

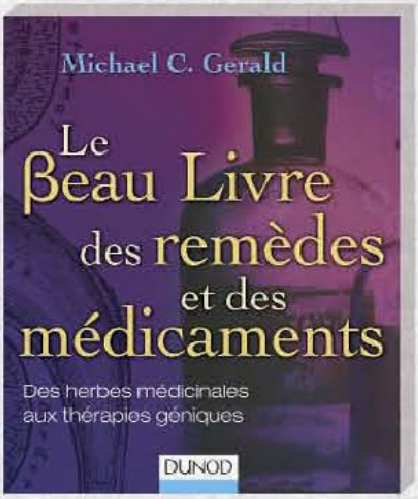
NOUVEAUTÉS OCTOBRE 2014



9782100706839 – 29 €

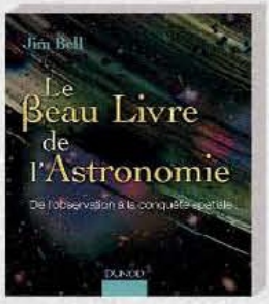


9782100701759 – 25.90 €

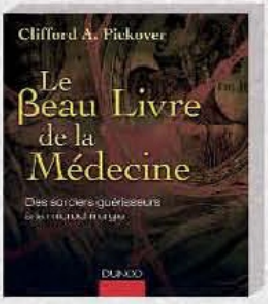


9782100706839 – 29 €

DÉJÀ PARUS

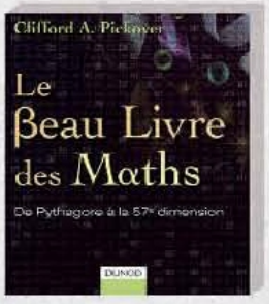


9782100599752 – 29 €

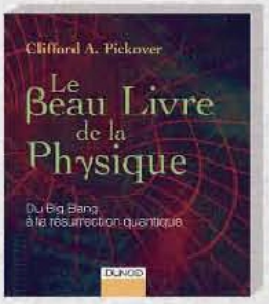


9782100589265 – 29 €

9782100702350 – 25.90 €



9782100546404 – 29 €



9782100572724 – 29 €

Tout le catalogue sur dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS